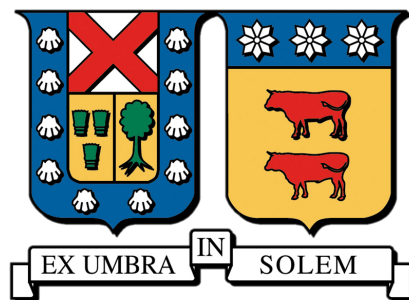


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA



**“RESULTADOS EMPÍRICOS DE LA ATENUACIÓN CAUSADA POR
OBSTRUCCIÓN HUMANA EN CANALES INALÁMBRICOS A 2.4
GHz Y 18 GHz”**

JAVIER ANDRÉS ÓRDENES PINTO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO, MENCIÓN
TELECOMUNICACIONES

PROFESOR GUÍA: MELISSA DIAGO MOSQUERA
PROFESOR CORREFERENTE: SAMUEL MONTEJO SANCHEZ

30 de junio de 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Resultados empíricos de la atenuación causada por obstrucción humana en canales inalámbricos a 2.4 y 1.8 GHz

Nombre del candidato(a): Javier Andrés Órdenes Pinto

Carrera / Grado: Ingeniería civil Electrónica

Campus: casa central, Valparaíso Departamento: Electrónica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Melissa Eugenia Diago Mosquera, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

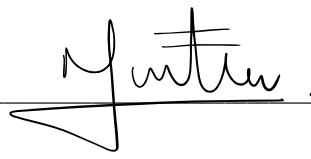
☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 01/09/2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 01/09/2026

Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

Gracias a mi familia, en especial a mi mamá y a mi papá, que me enseñaron a nunca rendirme y me han apoyado en cada locura que se me ha ocurrido. Gracias por estar ahí en los momentos más difíciles. A mi hermana, gracias por apoyarme desde que era chico, por enseñarme que todo es posible y por ser esa inspiración y modelo a seguir para convertirme en un buen profesional. El camino no fue para nada fácil, pero tomo esto como mi primer gran logro después de haber tropezado y fracasado un montón de veces.

También quiero agradecer a cada profesor que dejó una huella y me inspiró durante todos estos años de carrera.

Por último, gracias a todos los que hicieron posible el desarrollo de esta tesis. En especial a Erick, por la tremenda ayuda en todo el proceso con los equipos, desde la calibración hasta mover cielo, mar y tierra en la campaña de medición. Y por supuesto, muchísimas gracias a Sebastián, Gaspar, Renata y Sergio por participar en las mediciones. Sin ustedes, esta investigación no hubiera sido posible.

Resumen

El desarrollo de las futuras redes de quinta (5G) y sexta generación (6G) invita a evaluar el aprovechamiento de bandas centimétricas (p. ej., 18 GHz), donde la obstrucción humana degrada la viabilidad de los enlaces con línea de vista directa (LoS). Este estudio presenta una caracterización empírica y estocástica del bloqueo humano, comparando enlaces punto a punto a 2.4 GHz y 18 GHz en un entorno semi-exterior mediante cruces controlados y tráfico aleatorio. Los resultados evidencian diferencias significativas en los mecanismos de propagación de ambas bandas. A 2.4 GHz, la difracción mitiga la atenuación; el análisis predictivo demuestra que las pérdidas se saturan de forma logarítmica a partir de una densidad de cuatro peatones simultáneos. En contraste, a 18 GHz, el cuerpo humano actúa como un obstáculo altamente atenuante que bloquea por completo la estrecha primera zona de Fresnel, provocando caídas de señal abruptas superiores a 30 dB. Respecto a la caracterización temporal, los eventos de sombra (SE) a 18 GHz presentan una menor duración debido a lo estrecho del haz, pero con una mayor profundidad respecto a los de 2.4 GHz. Al evaluar el tráfico aleatorio, la distribución Log-Normal logra ajustarse de forma consistente a las variables temporales (duración de ráfagas y tiempo de canal despejado) en ambas frecuencias. Sin embargo, para modelar la atenuación máxima (A_{max}) a 18 GHz, la distribución Log-Normal no se ajusta; en su lugar, de las distribuciones teóricas evaluadas, la de Weibull fue la que mejor se adaptó a los datos empíricos. Finalmente, la alta recurrencia de los bloqueos induce tasas de indisponibilidad (UR) críticas que superan el 35% en escenarios de alta densidad peatonal para ambas bandas. Se concluye que el diseño de enlaces en estas frecuencias debe basarse en estos modelos estocásticos para dimensionar adecuadamente los márgenes de desvanecimiento.

Palabras clave: Atenuación, bloqueo humano, redes 5G y 6G, ondas centimétricas, Línea de vista, modelamiento estocástico, margen de desvanecimiento, distribución Weibull.

Abstract

The deployment of 5G and 6G networks demands the exploitation of centimeter-wave bands (e.g., 18 GHz), where human blockage degrades the viability of line-of-sight (LoS) links. This study presents an empirical and stochastic characterization of pedestrian blockage, comparing point-to-point links at 2.4 GHz and 18 GHz in a semi-outdoor environment through controlled crossings and random traffic. The results show significant differences in the propagation mechanisms of both bands. At 2.4 GHz, diffraction mitigates attenuation; predictive analysis demonstrates that losses saturate logarithmically starting from a density of four simultaneous pedestrians. In contrast, at 18 GHz, the human body acts as a highly attenuating obstacle that completely blocks the narrow first Fresnel zone, causing abrupt signal drops exceeding 30 dB. Regarding temporal characterization, shadowing events (SE) at 18 GHz present a shorter duration due to the narrow beamwidth, but with greater depth compared to those at 2.4 GHz. When evaluating random traffic, the Log-Normal distribution consistently fits the temporal variables (burst duration and clear channel time) at both frequencies. However, to model the maximum attenuation at 18 GHz, the Log-Normal distribution does not fit; instead, among the evaluated theoretical distributions, the Weibull distribution best adapted to the empirical data. Finally, the high recurrence of blockages induces critical unavailability rates (UR) exceeding 35% in dense scenarios for both bands. It is concluded that link design at these frequencies must rely on these stochastic models to adequately dimension fading margins.

Keywords: Attenuation, human blockage, 5G and 6G networks, centimeter waves, line-of-sight (LoS), stochastic modeling, fade margin, Weibull distribution.

Glosario

Amax Atenuación Máxima: Corresponde al punto de desvanecimiento más profundo alcanzado por la señal durante el transcurso de un Evento de Sombra (SE).

Amean Atenuación Promedio: Es el promedio aritmético de la profundidad del desvanecimiento calculado sobre todas las muestras discretas dentro de la ventana total del evento.

CDF Función de Distribución Acumulada (Cumulative Distribution Function): Herramienta matemática utilizada para mapear de forma empírica y probabilística el comportamiento de las señales.

FSPL Pérdida en Espacio Libre (Free Space Path Loss): Modelo de propagación que asume un entorno geométrico ideal, libre de obstáculos y *clutter* en las cercanías del enlace.

HPBW Ancho de haz a mitad de potencia: Separación angular entre los dos puntos donde el patrón de radiación de una antena decae a la mitad de su potencia máxima.

LoS Línea de Vista (Line of Sight): Condición de propagación directa y libre de obstáculos entre la antena transmisora y la receptora.

MLP Potencia Local Media (Mean Local Power): Nivel de potencia promedio recibido en el sistema operando de forma estática bajo una línea de vista totalmente despejada y libre de personas.

RF Radiofrecuencia: Espectro de frecuencias utilizado para la transmisión de las señales inalámbricas.

Rx Receptor: Terminal encargado de capturar la señal electromagnética en el enlace inalámbrico.

SDR Radio Definido por Software (Software Defined Radio): Arquitectura de hardware y software (como el ADALM-PLUTO) capaz de realizar procesamiento digital rápido de las muestras de señal, calculando transformadas como la FFT.

- SE Evento de Sombra (Shadowing Event):** Intervalo temporal continuo en el cual la potencia de la señal decae por debajo de un umbral de atenuación crítico respecto al nivel de referencia de la MLP.
- SSE Serie de Eventos de Sombra (Shadowing Event Series):** Consolidación matemática y estocástica de eventos de desvanecimiento individuales consecutivos (ráfagas) que ocurren con una separación temporal inferior a un umbral crítico establecido.
- Tclear Tiempo de canal despejado:** Ventana temporal en la que no se presentan bloqueos por obstáculos y la señal mantiene niveles óptimos de recepción.
- TSSE Duración de ráfagas:** Intervalo o tiempo de duración individual correspondiente a una Serie de Eventos de Sombra (SSE) agrupada.
- Tx Transmisor:** Terminal que genera y emite la señal electromagnética hacia el espacio libre.
- UR Tasa de Indisponibilidad (Unavailability Rate):** Métrica porcentual que cuantifica la proporción de tiempo total durante el cual el canal de radiofrecuencia se encuentra en estado de interrupción o bloqueo severo.
- 5G Quinta Generación:** Generación de redes de telecomunicaciones diseñada para absorber la creciente demanda de tráfico inmediato, optimizando la estabilidad y la velocidad de los sistemas de transmisión.
- 6G Sexta Generación:** Próxima generación de tecnología de redes inalámbricas cuya viabilidad técnica radica en la definición de nuevas arquitecturas y el aprovechamiento de frecuencias superiores (bandas centimétricas) para mitigar la congestión del espectro.
- AI Inteligencia Artificial:** Tecnología que, en convergencia con la computación en la nube y los sistemas móviles, impulsa el cambio paradigmático del tráfico de red hacia la era de la "inteligencia conectada".
- M2M Máquina a Máquina (Machine to Machine):** Comunicaciones autónomas entre dispositivos que, sumadas a la automatización industrial, contribuyen significativamente a la explosión del tráfico de subida en las redes de telecomunicaciones.
- QoS Calidad de Servicio (Quality of Service):** Métrica de desempeño y confiabilidad de la red que experimenta degradación y pérdida severa de paquetes cuando existen estimaciones imprecisas del canal inalámbrico.
- WAN Red de Área Amplia (Wide Area Network):** Infraestructura de red de telecomunicaciones a nivel mundial cuyo volumen de tráfico se proyecta que escale masivamente, multiplicándose entre tres y siete veces para el año 2034.

CW Onda Continua (Continuous Wave): Señal portadora continua e ininterrumpida, utilizada durante el proceso de calibración de los equipos de medición en la cámara anecoica para caracterizar las pérdidas del sistema.

Índice de contenidos

Resumen	2
Abstract	3
Glosario	4
1. Introducción	8
1.1. Introducción	8
1.2. Planteamiento del Problema	9
1.3. Objetivos	9
1.4. Estructura del Documento	10
2. Marco Teórico y Estado del Arte	11
2.1. Fundamentos de Enlaces Inalámbricos y Parámetros del Sistema	11
2.1.1. El Canal Inalámbrico	11
2.1.2. Antenas y Ganancia de Antena	12
2.1.3. Patrón de Radiación	12
2.1.4. Unidades de Potencia y Escala Logarítmica	13
2.1.5. Desvanecimiento a Gran y Pequeña Escala	13
2.2. Balance de Enlace	15
2.3. Modelos de Pérdida Base y Propagación en Espacio Libre	15
2.3.1. Ecuación de Transmisión de Friis y FSPL	15
2.3.2. Elipsoides de Fresnel	16
2.3.3. Regiones de Campo de una Antena	17
2.3.4. Contraste entre Bandas de 2.4 GHz y 18 GHz	19
2.4. Fenómenos de Interacción Electromagnética	19
2.5. Caracterización Estadística del Canal	20
2.6. Estado del Arte	21
3. Metodología	24
3.1. Metodología de Caracterización de SE	25

3.2.	Interpolación para muestras capturadas a 18 GHz	27
3.3.	Tasa de indisponibilidad	28
3.4.	Instrumentación y Equipamiento	28
3.5.	Diseño del Enlace Inalámbrico	29
3.5.1.	Análisis de la Primera Zona de Fresnel y Campo Lejano	30
3.5.2.	Balances de Potencia y Niveles de Seguridad	31
3.6.	Caracterización y Calibración del Sistema	32
3.6.1.	Calibración del Sistema SDR (2.4 GHz)	32
3.6.2.	Calibración del Sistema de 18 GHz	33
3.7.	Campaña de Medición	34
3.7.1.	Equipamiento y Geometría del Enlace	35
3.7.2.	Metodología de Eventos Controlados (Casos $N = 1$ a $N = 5$)	35
3.7.3.	Metodología de Tráfico Aleatorio	36
4.	Resultados y Análisis	38
4.1.	Análisis de Eventos Controlados: Efecto Acumulativo de Peatones	39
4.1.1.	Análisis de la atenuación máxima y media para eventos controlados	40
4.1.2.	Análisis de la duración de eventos de bloqueo en escenarios controlados	44
4.1.3.	Modelamiento Predictivo de Atenuación por Densidad Peatonal	45
4.2.	Análisis de Tráfico Aleatorio	48
4.2.1.	Modelamiento Empírico de T_{SSE}	51
4.2.2.	Modelamiento Empírico de T_{clear}	52
4.2.3.	Modelamiento Empírico de la Atenuación Máxima (A_{max_SSE})	54
5.	Conclusiones y Trabajos Futuros	56
5.1.	Hallazgos de la Investigación	56
5.2.	Limitaciones de la Investigación	58
5.3.	Trabajos Futuros	59

Índice de figuras

2.1. Elementos de sistemas de comunicaciones inalámbricas [1]	12
2.2. Patrón de potencia en dB ilustrando el ancho de haz a mitad de potencia (HPBW), los puntos de -3 dB y la polarización relativa (+/-) en los lóbulos[2].	13
2.3. Potencia recibida en función de la separación entre transmisor y receptor. Se observa la tendencia promedio (desvanecimiento a gran escala) y las fluctuaciones rápidas superpuestas (desvanecimiento a pequeña escala) [3]	14
2.4. Distribución bidimensional de las sucesivas zonas de Fresnel en un enlace punto a punto [4].	16
2.5. Criterio de despeje mínimo (60 %) y margen de obstrucción máxima permisible en el elipsoide de la primera zona[4].	17
2.6. Regiones de campo en el espacio circundante de una antena [2].	18
3.1. Representación gráfica de la ventana temporal de un Evento de Sombra (SE). Se ilustra el perfil de la curva de atenuación junto con la extracción de sus métricas clave: la atenuación máxima detectada (A_{max}) y la atenuación promedio calculada (A_{mean}).	26
3.2. Comparativa entre interpolación Spline y PCHIP aplicada a las muestras de potencia recibida a 18 GHz.	27
3.3. Diagrama de enlaces a 2.4 y 18 GHz	30
3.4. Radios de la primera zona de Fresnel. Color rojo para 18 GHz y verde para 2.4 GHz.	30
3.5. Montaje experimental para el proceso de calibración en cámara anecoica del enlace de 2.4 GHz.	33
3.6. Escenario empírico de medición en la multicancha deportiva de la Sede Casa Central.	35
3.7. Configuración experimental y metodología para escenarios controlados de bloqueo por cuerpo humano ($N=1,\dots,5$).	36
3.8. Configuración geométrica y delimitación del escenario de medición para eventos de sombra.	37

3.9. Metodología de ejecución para los escenarios de medición con movimiento de peatones de forma controlada y estocástica.	37
4.1. Visualización de los datos en bruto (<i>raw data</i>) adquiridos durante la campaña de medición a 2.4 GHz (a) y 18 GHz (b).	39
4.2. Perfiles de atenuación normalizada respecto a la Potencia Local Media (MLP) para el escenario de un cruce peatonal ($N = 2$) en enlace de 2.4 GHz (a) y 18 GHz (b).	39
4.3. Morfología comparativa del desvanecimiento temporal entre 2.4 GHz y 18 GHz para eventos de cruce peatonal sincronizados.	40
4.4. Simulación geométrica de la primera zona de Fresnel bajo condiciones de bloqueo.	42
4.5. CDFs empíricas para la atenuación máxima absoluta (A_{max}) bajo cruces peatonales controlados ($N = 1 \dots 5$).	43
4.6. CDFs empíricas para la atenuación media (A_{mean}) bajo cruces peatonales controlados ($N = 1 \dots 5$).	44
4.7. Distribución probabilística de la duración temporal (T) de los SE en milisegundos, evidenciando el impacto del radio de la zona de Fresnel.	45
4.8. Modelos predictivos de atenuación frente a densidad peatonal creciente. Se observa la saturación logarítmica producto del solapamiento de sombras en los escenarios de mayor densidad. Los puntos grises corresponden a las mediciones de A_{max} y A_{mean} por cada caso N.	46
4.9. Perfil temporal de la potencia recibida en el enlace de 2.4 GHz bajo un escenario de tráfico peatonal aleatorio.	49
4.10. Perfil temporal de la potencia recibida en el enlace de 18 GHz bajo un escenario de tráfico peatonal aleatorio.	50
4.11. CDFs empíricas frente a distribuciones teóricas para la duración de ráfagas (T_{SSE}).	52
4.12. CDFs empíricas frente a distribuciones teóricas avanzadas para el tiempo de canal despejado (T_{clear}).	53
4.13. Funciones de Distribución Acumulada (CDF) empíricas frente a distribuciones teóricas consistentes para la atenuación máxima de ráfagas (A_{max_SSE}). . .	55

Índice de tablas

2.1. Comparación con Estudios Previos en 2.4 GHz	23
2.2. Comparación con Estudios Previos en 18 GHz	23
3.1. Comparativa del equipamiento técnico e instrumentación utilizado para las bandas de 18 GHz y 2.4 GHz.	29
3.2. Comparación de equipos de medición RF.	29
3.3. Parámetros geométricos del montaje experimental.	31
3.4. Comparativa de parámetros de propagación y difracción.	31
3.5. Límites de la región de Fraunhofer (Campo Lejano).	31
3.6. Balance de potencia para una distancia de 5,06 m y $P_{TX} = 0\text{dBm}$	32
3.7. Resumen del presupuesto de enlace y pérdidas en exceso para una frecuencia de 2.4 GHz.	33
3.8. Resumen del presupuesto de enlace y pérdidas en exceso para la banda de 18 GHz.	34
4.1. Análisis de atenuación y duración en escenarios controlados para el Percentil 90.	41
4.2. Análisis de diferencias (Δ) consecutivas de atenuación según el número de peatones (N) para el Percentil 90.	41
4.3. Modelos de regresión predictiva para la atenuación en función del número de personas (N).	45
4.4. Análisis estadístico de dispersión para la atenuación promedio (A_{mean}) en función del número de peatones (N).	47
4.5. Análisis estadístico de dispersión para la atenuación máxima (A_{max}) en fun- ción del número de peatones (N).	48
4.6. Parámetros de detección y agrupación utilizados en el escenario de tráfico aleatorio para ambas bandas de frecuencia.	49
4.7. Resumen comparativo de las Series de Eventos de Shadowing (SSE) bajo condiciones de tráfico peatonal aleatorio de alta densidad.	50
4.8. Métricas de bondad de ajuste para la duración de las ráfagas (T_{SSE}) a 2.4 GHz y 18 GHz.	51

4.9. Métricas de bondad de ajuste para el tiempo de canal despejado (T_{clear}) bajo modelos con cola asimétrica.	53
4.10. Métricas de bondad de ajuste para la profundidad máxima de atenuación (A_{max_SSE}) expresada en dB absolutos.	54

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

Las telecomunicaciones constituyen uno de los pilares tecnológicos más disruptivos del último siglo, al viabilizar la interconectividad instantánea a escala global. En la actualidad, el despliegue de las redes de quinta generación (5G) ha permitido absorber la creciente demanda inmediata optimizando la estabilidad y la velocidad de los sistemas de transmisión. No obstante, la conectividad global se encuentra en un punto de inflexión sin precedentes. Según proyecciones de la industria, el tráfico en redes de área amplia (WAN) a nivel mundial se multiplicará entre tres y siete veces para el año 2034, alcanzando un volumen estimado de 4878 Exabytes por mes [5]. En el segmento móvil, se anticipa que el tráfico global escalará hasta los 482 Exabytes mensuales hacia finales de 2031 [6].

Este crecimiento masivo no responde únicamente a una expansión en volumen, sino a un cambio paradigmático en la naturaleza del tráfico. Históricamente, las arquitecturas de red se diseñaron para un consumo asimétrico dominado por la descarga de datos. Hoy en día, la convergencia de la Inteligencia Artificial (AI), la computación en la nube y los sistemas móviles impulsa la era de la “inteligencia conectada”. Esta transición enfrenta a la infraestructura actual a un escenario de saturación inminente debido a la explosión del tráfico de subida, el auge de las comunicaciones autónomas Máquina a Máquina (M2M) y la automatización industrial.

Para mitigar este solapamiento y prevenir la degradación del servicio, los organismos de estandarización han iniciado el desarrollo de la tecnología de sexta generación (6G), cuya viabilidad técnica radica en la definición de nuevas arquitecturas y el aprovechamiento de frecuencias superiores. La congestión del espectro radioeléctrico en las bandas bajas y medias obliga a explorar nuevas fronteras espectrales, posicionando a las bandas centimétricas —específicamente en torno a los 18 GHz y 22 GHz— como un recurso estratégico para la próxima generación de redes inalámbricas [7]-[8].

1.2 Planteamiento del Problema

La operación en frecuencias centimétricas incluye severos desafíos de propagación. A diferencia de las frecuencias tradicionales de 2.4 GHz, donde la longitud de onda permite mitigar obstáculos mediante fenómenos de difracción y trayectorias múltiples, las señales en la banda de 18 GHz exhiben un comportamiento altamente directivo y dependen estrictamente de condiciones de LoS. En entornos industriales y de oficina, la movilidad del personal técnico representa uno de los factores de perturbación más críticos [9]. Debido a su composición dieléctrica y geometría, el cuerpo humano actúa como un obstáculo de alta atenuación que interrumpe el enlace físico, provocando desvanecimientos abruptos en la potencia de la señal recibida; un fenómeno crítico denominado desvanecimiento por cuerpo humano [10]- [11].

Por consiguiente, resulta indispensable realizar una caracterización empírica de este fenómeno de bloqueo mediante un análisis comparativo entre bandas tradicionales a 2.4 GHz [12]-[13] y bandas superiores a 18 GHz [14]. La cuantificación precisa de esta atenuación aportará los parámetros estadísticos necesarios para robustecer los modelos de canal dinámicos y diseñar balances de enlace.

El modelamiento preciso del canal inalámbrico se establece, por tanto, como un pilar fundamental para el diseño de sistemas robustos. Como sostienen diversos autores [15, 16], la capacidad de anticipar las características estadísticas y físicas del entorno faculta la evaluación de arquitecturas de red previo a su implementación física. En el marco de las redes de última generación, estimaciones imprecisas del canal derivan en pérdidas severas de paquetes y en la degradación de la Calidad de Servicio (QoS) [17]. De este modo, la modelación matemática trasciende el análisis teórico para consolidarse como una herramienta crítica de optimización espectral y diseño de enlaces de comunicación.

1.3 Objetivos

El principal propósito del trabajo es caracterizar y modelar estocásticamente el impacto de la atenuación inducida por bloqueo humano sobre enlaces inalámbricos que operan a 2.4 GHz y 18 GHz. Se busca establecer una formulación matemática y empírica de cómo la densidad y dinámica peatonal en ambientes semi-extteriores degrada el balance de enlace y compromete la disponibilidad temporal del canal.

Objetivo General:

- Caracterizar, cuantificar y modelar empíricamente el impacto estocástico y controlado de los eventos de atenuación inducidos por tráfico peatonal sobre enlaces inalámbricos directos en las bandas de 2.4 GHz y 18 GHz.

Objetivos Específicos:

- Diseñar, calibrar y validar un enlace de radiofrecuencia (RF) punto a punto para ambas bandas operativas, garantizando la resolución temporal y de potencia necesaria en los equipos de medición analíticos.
- Estructurar e implementar campañas de medición empíricas en escenarios semi-exteiores, capturando tanto eventos de bloqueo controlado (múltiples personas simultáneas) como el comportamiento del canal bajo tráfico peatonal continuo y aleatorio.
- Desarrollar algoritmos de procesamiento digital en MATLAB para la extracción, filtrado y agrupación temporal de los eventos de sombra (SE), correlacionando los registros electromagnéticos con validación audiovisual.
- Evaluar e interpretar los datos obtenidos mediante modelamiento estadístico, ajustando distribuciones teóricas de probabilidad (Log-Normal, Weibull, Gamma) y regresiones matemáticas predictivas para formular modelos empíricos que definan la severidad y el margen de desvanecimiento de ambas frecuencias operativas.

1.4 Estructura del Documento

Con el fin de facilitar la lectura y comprensión de la presente investigación, el documento se ha estructurado en cinco capítulos principales, los cuales se describen a continuación:

- **Capítulo 2: Marco Teórico:** Proporciona los fundamentos conceptuales necesarios sobre la propagación de ondas electromagnéticas, modelos de pérdida por trayectoria (*path loss*) y los fenómenos físicos de atenuación, reflexión y dispersión (*scattering*) que afectan los enlaces de radiofrecuencia.
- **Capítulo 3: Metodología:** Detalla el diseño experimental del enlace inalámbrico, incluyendo la calibración de los equipos y la configuración del escenario de medición. Asimismo, se describe el procedimiento de captura de datos y las herramientas utilizadas para el procesamiento de las señales.
- **Capítulo 4: Resultados y Análisis:** Expone y analiza los datos empíricos obtenidos durante las campañas de medición. Se incluye una comparación crítica de la atenuación causada por la presencia humana entre ambas frecuencias de interés, utilizando métricas estadísticas y análisis de desvanecimiento.
- **Capítulo 5: Conclusiones y Trabajos Futuros:** Sintetiza los hallazgos más relevantes del trabajo, evaluando el cumplimiento de los objetivos planteados. Finalmente, se proponen líneas de investigación futuras para profundizar en el modelamiento de canales en bandas de frecuencia superiores.

Capítulo 2

Marco Teórico y Estado del Arte

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos y conceptos técnicos necesarios para comprender la propagación de ondas electromagnéticas y los fenómenos de interferencia en las bandas de frecuencia de estudio. Estas bases permiten sustentar el análisis empírico y comparativo entre los enlaces de 2.4 GHz y 18 GHz.

2.1 Fundamentos de Enlaces Inalámbricos y Parámetros del Sistema

El análisis de cualquier arquitectura de comunicación inalámbrica requiere la definición formal de los elementos que constituyen el canal de RF y las unidades de medida empleadas para cuantificar la energía transferida.

2.1.1 El Canal Inalámbrico

El canal inalámbrico es el medio físico a través del cual se propaga la onda electromagnética desde la antena transmisora hasta la receptora. A diferencia de los medios guiados, el canal radioeléctrico es inherentemente adverso, dinámico y no estacionario. Las perturbaciones que afectan a la señal en el receptor se subdividen tradicionalmente en dos efectos principales:

- **Efectos Aditivos:** Introducen ruido e interferencias de forma lineal sobre la señal. El ruido aditivo proviene tanto de fuentes internas del propio hardware receptor (como el ruido térmico y de disparo en componentes pasivos y activos) como de fuentes externas (radiación cósmica, efectos atmosféricos e interferencia co-canal).
- **Efectos Multiplicativos:** Surgen de los procesos físicos que experimenta la onda en su trayecto. Estos procesos se manifiestan en forma de atenuaciones temporales y espaciales que se clasifican en tres escalas: la pérdida por trayectoria (*path loss*), el ensombrecimiento (*shadowing* o desvanecimiento lento) y el desvanecimiento rápido (*fast fading*).

2.1.2 Antenas y Ganancia de Antena

Una antena es un dispositivo transductor diseñado para acoplar la energía guiada de una línea de transmisión al espacio libre (en transmisión) o viceversa (en recepción). La ganancia de una antena (G_T para el transmisor y G_R para el receptor) es una magnitud adimensional o expresada en escala logarítmica que cuantifica la capacidad del dispositivo para enfocar la energía radiada en una dirección específica en comparación con una antena de referencia.

Las unidades de medida más comunes para la ganancia es:

- **dBi (Decibelios respecto a un radiador isotrópico):** Toma como referencia una antena teórica ideal que radia la energía de manera uniforme en forma de una esfera perfecta. Es la unidad estándar

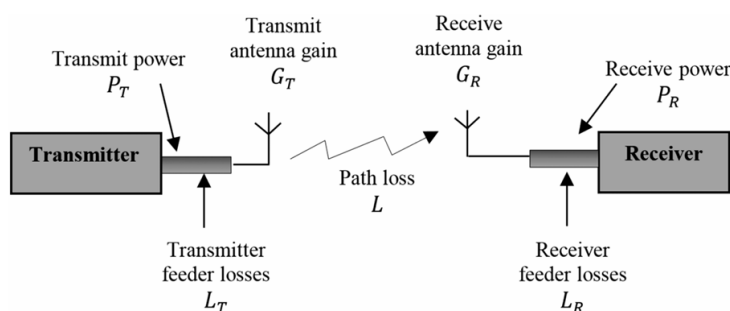


Figura 2.1: Elementos de sistemas de comunicaciones inalámbricas [1]

2.1.3 Patrón de Radiación

Un patrón de radiación (o diagrama de radiación) se define como una representación gráfica o una función matemática de las propiedades de radiación de una antena en función de las coordenadas espaciales. En la mayoría de los casos, este patrón se determina en la región de campo lejano y representa la distribución espacial de la energía radiada [2].

Frecuentemente, estos patrones se normalizan respecto a su valor máximo. En la Figura 2.2 se observa un patrón de potencia normalizado en escala logarítmica.

Como se ilustra en la figura, los signos (+) y (−) presentes en los lóbulos indican la polarización relativa de la amplitud, la cual se alterna cada vez que el patrón cruza un nulo.

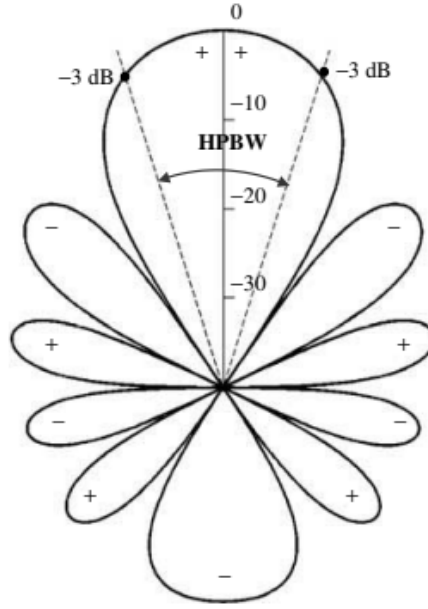


Figura 2.2: Patrón de potencia en dB ilustrando el ancho de haz a mitad de potencia (HPBW), los puntos de -3 dB y la polarización relativa (+/-) en los lóbulos[2].

Un parámetro fundamental derivado de este gráfico es el ancho de haz a mitad de potencia (HPBW), definido como la separación angular entre los dos puntos donde el patrón de radiación decae a la mitad de su potencia máxima.

2.1.4 Unidades de Potencia y Escala Logarítmica

Debido al amplio rango dinámico que experimentan los sistemas de telecomunicaciones, donde las señales decaen de forma exponencial con la distancia, las magnitudes de potencia se expresan habitualmente en decibelios para simplificar los cálculos matemáticos.

La potencia absoluta disponible a la salida de un transmisor (P_T) o capturada por el receptor (P_R) puede expresarse de forma lineal en vatios (W) o milivatios (mW). En la escala logarítmica, las unidades estándar son:

- **dBm:** Potencia expresada en decibelios relativa a un nivel de referencia de 1 mW. Su conversión desde la potencia lineal en milivatios (P_{mW}) se define como:

$$P[\text{dBm}] = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{mW}}{1 \text{ mW}} \right) \quad (2.1)$$

2.1.5 Desvanecimiento a Gran y Pequeña Escala

El desvanecimiento (fading) en comunicaciones inalámbricas se clasifica en dos tipos principales [3], cuyo comportamiento conjunto puede apreciarse en la Figura 2.3.

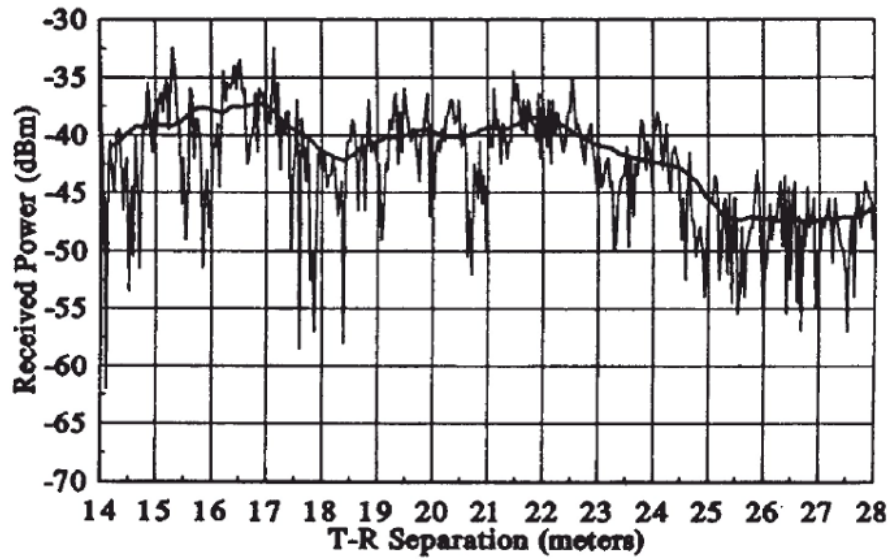


Figura 2.3: Potencia recibida en función de la separación entre transmisor y receptor. Se observa la tendencia promedio (desvanecimiento a gran escala) y las fluctuaciones rápidas superpuestas (desvanecimiento a pequeña escala) [3]

Desvanecimiento a Gran Escala (*Large-Scale Fading*)

Representa la atenuación promedio de la potencia de la señal a lo largo de grandes distancias, dictada por el terreno y los obstáculos. Se modela estadísticamente mediante una pérdida de trayectoria media con una variación de distribución log-normal. En la Figura 2.3, corresponde a la curva suave central alrededor de la cual oscila la señal.

Desvanecimiento a Pequeña Escala (*Small-Scale Fading*)

Describe las fluctuaciones rápidas de amplitud y fase en distancias cortas (fracciones de longitud de onda) o tiempos breves, resultado de la propagación multitrayecto. Puede generar caídas abruptas de potencia de 30 a 40 dB, como se evidencia en los picos y valles pronunciados de la Figura 2.3. Se modela con una distribución de **Rayleigh** (sin línea de vista) o **Rice** (con línea de vista principal).

Según la tasa de variación del canal frente a las características de la señal, este desvanecimiento se manifiesta como:

- **Rápido (*Fast Fading*)**: El canal cambia rápidamente durante el período del símbolo ($T_s > T_c$) debido a un alto espacamiento Doppler ($B_s < B_d$).
- **Lento (*Slow Fading*)**: El canal es relativamente estático frente a la señal ($T_s < T_c$, $B_s > B_d$).

2.2 Balance de Enlace

El balance de enlace (*link budget*) es el procedimiento analítico y formal mediante el cual se determina la potencia estimada de la señal en el receptor, contabilizando rigurosamente todas las ganancias y pérdidas presentes a lo largo de la cadena de radiofrecuencia.

La ecuación general que gobierna un balance de enlace, expresada en decibelios, sigue la estructura fundamental:

$$\text{Potencia Recibida} = \text{Potencia Transmitida} + \text{Ganancias} - \text{Pérdidas} \quad (2.2)$$

Desglosando matemáticamente cada componente de un sistema real, la ecuación se formula como:

$$P_R = P_T - L_T + G_T - L + G_R - L_R \quad (2.3)$$

Donde P_T es la potencia de salida del transmisor, L_T representa las pérdidas por inserción en los cables y conectores del lado transmisor (*feeder loss*), G_T es la ganancia de la antena transmisora, G_R es la ganancia de la antena receptora, L_R representa las pérdidas en los cables del extremo receptor, y L constituye la pérdida por trayectoria total del canal.

2.3 Modelos de Pérdida Base y Propagación en Espacio Libre

El punto de partida para evaluar la atenuación del canal consiste en aislar los efectos puramente geométricos de la expansión de la onda en un medio ideal y homogéneo.

2.3.1 Ecuación de Transmisión de Friis y FSPL

La pérdida en espacio libre (FSPL) asume un entorno libre de obstáculos y clutter en las cercanías del enlace. Derivado directamente de la ley de la inversa del cuadrado (que describe la dispersión geométrica de la potencia sobre la superficie de una esfera en expansión), y de la dependencia lineal de la apertura de antena con la longitud de onda, el modelo se expresa en decibelios como:

$$\text{FSPL}[\text{dB}] = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d f}{c} \right) \quad (2.4)$$

Donde d es la distancia euclidiana de separación expresada en kilómetros, f es la frecuencia de operación en MHz y c es la velocidad de la luz en el vacío.

Para las condiciones específicas de la campaña experimental, con una distancia de separación horizontal de 5 m y un desnivel de alturas entre transmisor ($h_{TX} = 2$ m) y receptor ($h_{RX} = 1.2$ m), la distancia euclidiana en línea de vista directa resulta en $D_e = 5.06$ m con un ángulo de inclinación de $\theta = 9.09^\circ$. Al sustituir estos valores fijos en la ecuación 2.4, se obtienen las pérdidas base para ambas bandas de estudio:

- **Frecuencia 2.4 GHz:** FSPL ≈ 54.14 dB.
- **Frecuencia 18 GHz:** FSPL ≈ 71.65 dB.

2.3.2 Elipsoides de Fresnel

El análisis físico de un enlace real exige evaluar el volumen circundante al rayo directo. Las Zonas de Fresnel delimitan los elipsoides tridimensionales donde se concentra la transferencia de energía entre las antenas. El radio de la primera zona de Fresnel (R_1) en el punto medio del enlace simétrico está condicionado de forma directa por la longitud de onda λ :

$$R_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda D_e} \quad (2.5)$$

Dada la naturaleza geométrica del experimento enfocado en caracterizar el bloqueo, la reducción de λ altera drásticamente la resolución espacial del haz. Para el trayecto de $D_e = 5.06$ m, los radios calculados en el punto medio corresponden a:

- **Frecuencia 2.4 GHz:** $R_1 = 0.40$ m.
- **Frecuencia 18 GHz:** $R_1 = 0.15$ m.

La delimitación geométrica de estas zonas, extensibles a órdenes superiores (n), determina el comportamiento de la señal ante obstáculos en el medio. Aquellos reflectores o difractores situados justamente en los límites de las zonas de Fresnel de orden impar provocan interferencia destructiva debido a diferencias de camino óptico del orden de λ , lo que puede llegar a cancelar la señal directa. En la Figura 2.4 se detalla conceptualmente esta distribución concéntrica.

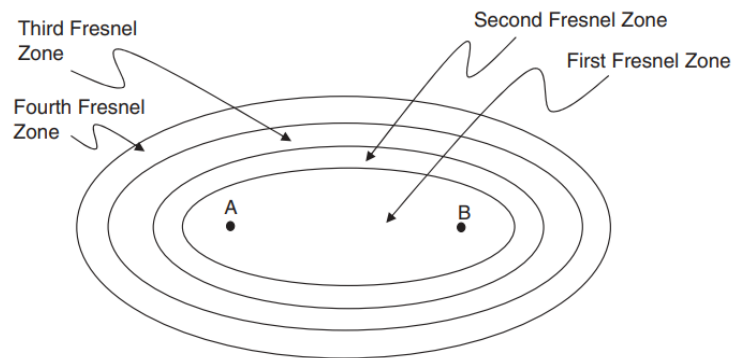


Figura 2.4: Distribución bidimensional de las sucesivas zonas de Fresnel en un enlace punto a punto [4].

De acuerdo con el principio de Huygens, la energía electromagnética difractada es la que rellena la zona de sombra en el extremo receptor; si la primera zona se obstruye, el modelo de

pérdida en espacio libre deja de ser válido, requiriendo un término de ajuste por atenuación. En la práctica, es suficiente mantener despejado el 60 % del radio de la primera zona de Fresnel ($0.6 R_1$) respecto al eje óptico para asegurar un impacto despreciable en el balance de enlace. Bajo este criterio de holgura, ilustrado en la Figura 2.5, el parámetro de difracción de Fresnel-Kirchhoff se sitúa en $v = -0.8$, lo que se traduce en una pérdida por difracción de 0 dB.

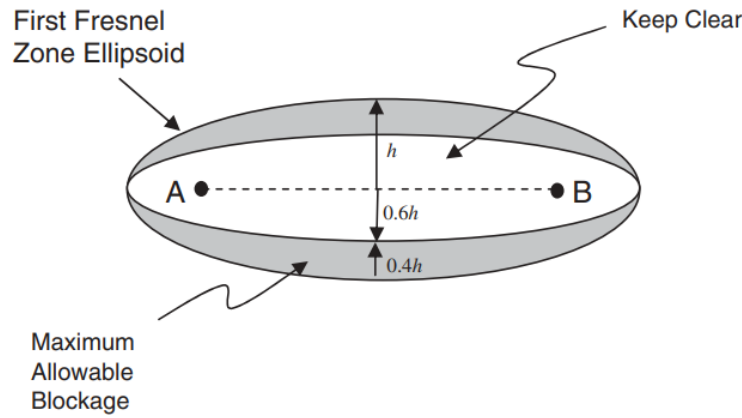


Figura 2.5: Criterio de despeje mínimo (60 %) y margen de obstrucción máxima permisible en el elipsoide de la primera zona[4].

Asimismo, para garantizar la validez matemática de las mediciones y confirmar que las antenas interactúan mediante frentes de onda planos (región de campo lejano), la distancia del enlace debe superar de manera estricta el límite físico de la distancia de Fraunhofer ($d_f = 2D_{ant}^2/\lambda$). Para la antena patch empleada en 2.4 GHz ($d_f = 0.42$ m) y la antena de bocina cónica de 21 dBi utilizada en 18 GHz ($d_f = 3.08$ m), se cumple con holgura el criterio geométrico $D_e > d_f$, validando experimentalmente los presupuestos de potencia diseñados.

2.3.3 Regiones de Campo de una Antena

El espacio que rodea a una antena se subdivide generalmente en tres regiones distintas para identificar la estructura, la configuración y el comportamiento del campo electromagnético en cada una de ellas: (a) región de campo cercano reactivo, (b) región de campo cercano radiante o de Fresnel, y (c) región de campo lejano o de Fraunhofer, tal como se ilustra en la Figura 2.6. Aunque la transición entre estas regiones es continua y no presenta cambios abruptos en la morfología de las ondas, se han establecido criterios matemáticos y de fase estándar para definir sus límites operativos.

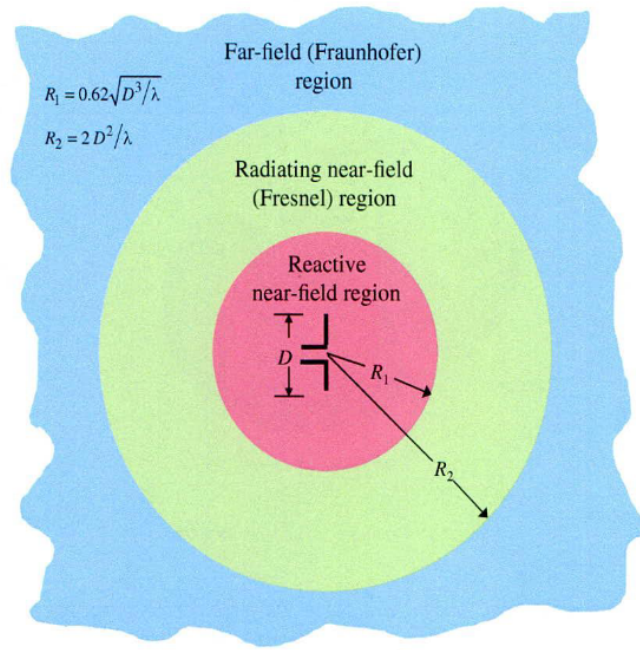


Figura 2.6: Regiones de campo en el espacio circundante de una antena [2].

Región de Campo Cercano Reactivo

Esta región comprende el espacio inmediatamente adyacente a la estructura de la antena, donde predomina el campo reactivo temporalmente almacenado y la propagación de energía hacia el espacio libre es mínima. Para la mayoría de los radiadores, el límite exterior de esta zona se define en una distancia $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$, donde D es la dimensión máxima de la antena y λ la longitud de onda. En el caso particular de radiadores eléctricamente cortos, este límite se aproxima convencionalmente a $\lambda/2\pi$.

Región de Campo Cercano Radiante (Fresnel)

Situada entre la zona reactiva y la de campo lejano, en la región de Fresnel los campos de radiación comienzan a predominar sobre los reactivos. Sin embargo, la distribución angular del campo aún carece de estabilidad y exhibe una fuerte dependencia respecto a la distancia radial a la antena. Su dominio espacial se establece típicamente en el intervalo $R \geq 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ y $R < 2D^2/\lambda$. Para antenas cuyas dimensiones son reducidas en comparación con la longitud de onda, esta zona de transición puede ser inexistente.

Región de Campo Lejano (Fraunhofer)

La región de campo lejano es de primordial importancia para la caracterización de enlaces de radiofrecuencia y el análisis de propagación, ya que constituye el área donde la distribución angular del campo electromagnético se vuelve esencialmente independiente de la distancia

respecto a la antena. En esta zona, el patrón de radiación adquiere su morfología definitiva, manteniéndose invariante ante variaciones en la distancia radial de observación.

A medida que el frente de onda se aleja de la antena transitando por las regiones cercanas, el patrón de amplitud experimenta fluctuaciones de magnitud y fase. No obstante, al ingresar a la región de Fraunhofer, dichas variaciones se estabilizan, permitiendo modelar localmente la radiación como una onda plana. En este dominio, los componentes del campo son puramente transversales. Esta condición de onda plana es fundamental para evaluar fenómenos de propagación en enlaces inalámbricos, tales como la atenuación por sombra provocada por obstáculos en la trayectoria de la señal.

Desde un punto de vista analítico, el límite interior de la región de campo lejano se establece en la distancia crítica $R = 2D^2/\lambda$, extendiéndose teóricamente hacia el infinito. Para asegurar la validez de este criterio de delimitación, se asume como precondition que la dimensión física de la antena es considerablemente mayor a la longitud de onda de operación ($D > \lambda$).

2.3.4 Contraste entre Bandas de 2.4 GHz y 18 GHz

La longitud de onda de operación dicta de forma estricta las leyes físicas que dominan el canal ante una obstrucción. En la banda de 2.4 GHz, la señal posee una longitud de onda larga ($\lambda \approx 125$ mm). En este régimen, las dimensiones físicas de un torso humano estándar superan la longitud de onda por un factor menor, permitiendo que los mecanismos de difracción operen eficientemente. La señal es capaz de rodear el contorno del cuerpo humano, lo que facilita que una fracción considerable de la potencia se reconstituya y sea capturada en el receptor, resultando en caídas de potencia moderadas.

Por el contrario, en la banda centimétrica de 18 GHz, la longitud de onda disminuye drásticamente hasta alcanzar escasos $\lambda \approx 16.7$ mm. Dado que las dimensiones promedio de un adulto superan la longitud de onda por varios órdenes de magnitud, el mecanismo de difracción pierde dominancia casi total. A 18 GHz, las señales son altamente directivas y dependientes de una línea de vista directa y limpia. En este escenario, el cuerpo humano se comporta mecánicamente como un obstáculo denso, opaco y geoméricamente masivo (de forma homóloga al comportamiento de un objeto frente a la luz óptica), bloqueando de manera casi total el haz principal y provocando desvanecimientos profundos y caídas abruptas de potencia inalámbrica.

2.4 Fenómenos de Interacción Electromagnética

Dado que el modelo FSPL modela un canal teóricamente vacío, cualquier entorno real introduce atenuaciones adicionales causadas por la presencia de *clutter*, suelo, paredes u obstáculos dinámicos dentro de la primera zona de Fresnel.

Cuando el frente de onda colisiona con un obstáculo o cambia de medio dieléctrico, la energía experimenta cuatro fenómenos fundamentales:

- **Reflexión:** Se produce cuando la onda incide sobre una superficie lisa cuyas dimensiones son mucho mayores que la longitud de onda (λ). Una fracción de la potencia rebota con un ángulo idéntico al de incidencia, originando trayectos indirectos que interfieren en el receptor.
- **Refracción:** Fenómeno complementario a la reflexión que ocurre cuando la onda penetra la estructura de un medio material diferente, sufriendo una alteración en su velocidad y dirección de propagación según sus propiedades dieléctricas.
- **Difracción:** Mecanismo fundamentado en el principio de Huygens-Fresnel que faculta a la onda para actuar como una fuente de radiación secundaria al impactar con bordes opacos, permitiendo que la señal rodee obstáculos físicos y penetre en regiones de sombra geométrica.
- **Dispersión (*Scattering*):** Ocurre cuando la onda choca con objetos de dimensiones comparables o inferiores a su longitud de onda, o con superficies rugosas, provocando que la energía se esparza tridimensionalmente de forma caótica.

2.5 Caracterización Estadística del Canal

La caracterización estocástica del canal radioeléctrico dinámico requiere la aplicación de herramientas probabilísticas descriptivas para parametrizar las fluctuaciones de la señal sometida a bloqueos físicos. Para modelar el comportamiento de la atenuación máxima y media producida por el bloqueo humano, se emplean distribuciones teóricas de probabilidad continua:

- **Distribución Log-Normal:** Constituye el estándar clásico y fundamental para modelar el ensombrecimiento a gran escala. Describe fenómenos en los que la atenuación del enlace es consecuencia de múltiples efectos multiplicativos (como la difracción sucesiva o la absorción parcial). Al analizar estos efectos en escala logarítmica (decibelios), el producto se transforma en una suma que, por el Teorema del Límite Central, adquiere una variabilidad Gaussiana. Es especialmente útil para modelar colas pesadas de probabilidad y asimetrías hacia desvanecimientos profundos.
- **Distribución de Weibull:** Originaria de la teoría de confiabilidad y el análisis de fallas en sistemas (teoría del eslabón más débil), esta distribución destaca por su extraordinaria flexibilidad empírica. En radiopropagación, se emplea para modelar desvanecimientos hiper-severos y bloqueos abruptos que rompen con los modelos multiplicativos

clásicos. Su uso es crítico al caracterizar canales donde el obstáculo actúa como una barrera altamente opaca (condición típica en bandas de alta frecuencia como las ondas milimétricas).

- **Distribución Gamma:** Modela variables aleatorias estrictamente positivas con asimetría hacia la derecha. En el contexto de telecomunicaciones, se utiliza para caracterizar procesos aditivos continuos y la dispersión temporal del canal. Su versatilidad geométrica la convierte en un modelo de contraste robusto frente a la Log-Normal y Weibull para describir la duración temporal de las ráfagas de interrupción y las transiciones del estado del enlace.
- **Funciones de Distribución Acumulada (CDF):** Representan la principal herramienta matemática para mapear de forma empírica el comportamiento de las señales bajo prueba. La construcción de CDFs permite no solo contrastar los datos experimentales con los modelos teóricos expuestos mediante métricas de bondad de ajuste (ej. Kolmogorov-Smirnov, AIC), sino también cuantificar empíricamente los percentiles críticos del sistema y el margen de desvanecimiento (*fade margin*) requerido.

2.6 Estado del Arte

Diversas investigaciones han abordado la caracterización de canales inalámbricos a 2.4 GHz, motivadas por su amplio uso en redes WiFi y aplicaciones de comunicaciones personales. En [9], se presenta una validación experimental de modelos de pérdida por trayectoria en entornos interiores comerciales, específicamente en una biblioteca de la Universidad de Patras; sin embargo, las mediciones se realizaron en horario matutino para minimizar la influencia de la obstrucción humana. Posteriormente, [13] analizó la propagación en entornos industriales complejos, llevando a cabo una campaña de medición que incluyó diversas habitaciones en un mismo nivel, así como distintas plantas de una instalación industrial. Aunque se reconocen obstrucciones físicas como paredes y mobiliario, no se considera explícitamente la presencia ni el efecto dinámico de personas sobre el canal. Por su parte, [18] desarrolló un modelo empírico orientado a ambientes exteriores sometidos a condiciones extremas de temperatura y humedad, destacando la importancia de incorporar factores ambientales en el modelado del canal. En [19] y [12], se emplean modelos de trazado de rayos como referencia comparativa frente a modelos empíricos y semiempíricos, respectivamente; si bien ambos estudios se desarrollan en escenarios indoor, [12] complementa la campaña incluyendo un entorno outdoor y menciona la presencia ocasional de personas en movimiento, aunque sin enfocarse en caracterizar dicho fenómeno. En 2024, [20] evidenció que los canales a 2.4 GHz y 5.8 GHz presentan diferencias notables en su comportamiento, lo que resalta la necesidad de utilizar modelos específicos para cada banda de operación. Finalmente, [21] y [22] destacan que, a

pesar de los numerosos estudios existentes sobre la banda de 2.4 GHz, siguen surgiendo escenarios particulares de interés, como el comportamiento del canal en el interior de una cabina de avión o en entornos subterráneos de minería.

En la banda de 18 GHz, las investigaciones se han centrado en modelar las características de propagación en interiores y su impacto en las futuras redes 5G y 6G. En 1997, [8] propuso un modelo estadístico basado en mediciones de laboratorio que describe la llegada de multi-trayectorias y la dispersión temporal; sin embargo, se especifica que la campaña de medición se realizó en horario vespertino, posterior a la jornada laboral, para evitar interferencias humanas. Posteriormente, [23] amplió el análisis a entornos urbanos exteriores en la banda de 3–18 GHz, comparando la transición entre las bandas micrométrica y milimétrica, las cuales, hasta 2018, no habían sido suficientemente estudiadas. Esta comparación surge de la reciente introducción de los sistemas móviles 5G, que operan en ambas bandas. En su estudio, se examina la dependencia de diversos parámetros respecto de la frecuencia en escenarios urbanos, aunque se reconoce la necesidad de realizar campañas de medición adicionales para generalizar los resultados. Por su parte, [7] desarrolló un modelo espaciotemporal basado en mediciones a 14, 18 y 22 GHz, empleando técnicas no paramétricas de identificación de clústeres en un corredor interior; al igual que en campañas anteriores, no se consideró la presencia de personas obstruyendo las líneas de vista, y las puertas se mantuvieron cerradas durante las mediciones. Asimismo, el mismo autor [14] propuso modelos empíricos de pérdida de trayecto y de probabilidad de LoS específicos para interiores a 18 GHz, en los cuales tampoco se incorpora la interferencia humana. De manera complementaria, [10] estudió experimentalmente el impacto de los movimientos humanos en la propagación en interiores en el rango de 18–22 GHz, considerando tres escenarios: bloqueo total de la línea de vista por una persona, desplazamiento de 6 cm hacia la derecha, y desplazamiento de 6 cm hacia la izquierda. En este trabajo se grafican las variaciones de la potencia de recepción en función de la frecuencia, y se destaca que los resultados representan un análisis preliminar, abriendo la posibilidad de futuros estudios más exhaustivos sobre el efecto del bloqueo humano a estas frecuencias.

Pese a estos avances, existen vacíos significativos. La mayoría de los trabajos en 2.4 GHz se centran en caracterizaciones estáticas o materiales de construcción, mientras que en 18 GHz aún falta un análisis sistemático del efecto de obstrucciones humanas dinámicas comparado directamente con bandas más bajas. No se han encontrado estudios que analicen simultáneamente y de manera correlacionada la atenuación humana en 2.4 GHz y 18 GHz bajo condiciones de medición equivalentes.

Esta investigación busca cubrir dichos vacíos, generando datos empíricos nuevos y modelos prácticos que permitan entender y mitigar la degradación por obstrucción humana en ambas bandas de frecuencia.

Tabla 2.1: Comparación con Estudios Previos en 2.4 GHz

Categoría \ Artículos									Este estudio
	[9]	[13]	[18]	[19]	[12]	[20]	[21]	[22]	
Modelo Empírico	✓	✓	✓	✓	—	✓	x	✓	✓
Considera Interferencia Humana	x	x	x	x	✓	x	✓	x	✓
Dinamismo de Obstáculos	x	x	x	x	✓	x	x	x	✓
Análisis Multi-Banda	x	x	x	✓	x	✓	✓	x	✓
Escenario Indoor	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Escenario Outdoor	x	x	✓	x	✓	x	x	x	x
Métricas Estadísticas	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	✓	✓
Año	2010	2017	2019	2022	2023	2024	2024	2025	2025

Tabla 2.2: Comparación con Estudios Previos en 18 GHz

Categoría \ Artículos							Este estudio
	[8]	[23]	[7]	[14]	[10]	[24]	
Modelo Empírico	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓
Considera Interferencia Humana	x	x	x	x	✓	x	✓
Dinamismo de Obstáculos	x	x	x	x	✓	x	✓
Análisis Multi-Banda	x	✓	✓	x	x	✓	✓
Escenario Indoor	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓
Escenario Outdoor	x	✓	x	x	x	x	x
Métricas Estadísticas	x	✓	✓	x	x	✓	✓
Año	1997	2018	2018	2018	2018	2021	2025

Capítulo 3

Metodología

La investigación se orienta a analizar y caracterizar empíricamente la atenuación causada por obstrucción humana en canales inalámbricos, considerando dos bandas de frecuencia de alta relevancia: 2.4 GHz, utilizada ampliamente en tecnologías de comunicación inalámbrica personal como Wi-Fi (estándares IEEE 802.11b/g/n) y Bluetooth (estándar IEEE 802.15.1), y 18 GHz, frecuencia clave en la transición hacia enlaces de ondas milimétricas y futuras aplicaciones 5G/6G.

Para alcanzar estos objetivos, la metodología se divide en fases consecutivas. En primer lugar, se diseñará y calibrará un enlace inalámbrico punto a punto empleando instrumentación de radiofrecuencia de grado laboratorio e industrial, incluyendo generadores de señales, analizadores de espectro y antenas direccionales acordes a las longitudes de onda de cada banda.

Con el sistema en operación, se estructurará una campaña de medición empírica en un ambiente semi-exterior. Esta etapa contemplará dos enfoques dinámicos: un escenario controlado, donde se introducirán obstrucciones peatonales sistemáticas de manera simultánea ($N = 1$ a 5 personas) para estudiar el efecto de saturación; y un escenario aleatorio continuo, para analizar el flujo peatonal natural. Durante las sesiones, se registrará el perfil de potencia recibida en el dominio del tiempo y se correlacionará con grabaciones en video para validar la veracidad geométrica de los cruces observados.

Posteriormente, la extracción y filtrado de datos empíricos se automatizará mediante rutinas de procesamiento de señales en MATLAB. Se implementarán algoritmos capaces de identificar caídas de potencia por debajo de un umbral estacionario, aislando Eventos de Sombra (SE) individuales y agrupándolos en Series de Eventos de Sombra (SSE) para capturar el efecto de aglomeración peatonal. De estos perfiles se extraerán métricas críticas como la atenuación máxima (A_{max}), atenuación media (A_{mean}), duración de las ráfagas (T_{SSE}) y el tiempo de canal despejado (T_{clear}).

Esta metodología se fundamenta en los enfoques experimentales propuestos en [25] y [11], expandiendo sus alcances mediante la comparativa directa entre frecuencias centimétricas y

sub-6 GHz, aportando modelos estadísticos fiables para el dimensionamiento de márgenes de desvanecimiento.

3.1 Metodología de Caracterización de SE

Para caracterizar matemáticamente las pérdidas y perturbaciones transitorias provocadas por el tráfico peatonal transversal, se adopta el protocolo de procesamiento y modelamiento formalizado por las directrices del grupo de trabajo del estándar IEEE 802.11ad.

El proceso requiere la adquisición continua de muestras de potencia de RF a alta velocidad. Se define la potencia Local Media (MLP) como el nivel de potencia promedio recibido en el sistema operando de forma estática bajo una línea de vista totalmente despejada y libre de personas. Un SE se define formalmente como el intervalo temporal continuo en el cual la potencia de la señal decae por debajo de un umbral de atenuación crítico respecto al nivel de referencia de la MLP debido al cruce de un obstáculo.

Cada SE individual es rigurosamente parametrizado a través de tres variables deterministas fundamentales extraídas de la serie de tiempo:

- **A_{max}** : Corresponde al punto de desvanecimiento más profundo alcanzado por la señal durante el transcurso de un SE, calculado de forma normalizada en decibelios respecto al nivel basal de la MLP:

$$A_{max}[\text{dB}] = P_{\min}[\text{dBm}] - \text{MLP}[\text{dBm}] \quad (3.1)$$

- **Duración Temporal (T)**: Intervalo de tiempo total, medido en milisegundos, que transcurre desde el instante en que la potencia decae bajo el umbral de sombra hasta que se restablece la línea de vista directa y la potencia retorna a los valores de la MLP.
- **A_{mean}** : Es el promedio aritmético de la profundidad del desvanecimiento calculado sobre todas las muestras discretas dentro de la ventana total del evento:

$$A_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A[i] \quad (3.2)$$

Donde N representa el número total de muestras en la ventana del evento, y $A[i]$ es el valor de la atenuación en la muestra i -ésima.

En condiciones operacionales reales y dinámicas, el movimiento de múltiples personas no es sincronizado, provocando bloqueos sucesivos y ráfagas caóticas de atenuación. Para modelar esta naturaleza estocástica, un conjunto de eventos individuales se consolida matemáticamente bajo el concepto de una serie de eventos de sombra (SSE). Siguiendo el modelo empírico

en [11], dos desvanecimientos consecutivos (denotados como j y $j + 1$) se agrupan dentro de una misma ráfaga o SSE continua si el tiempo de separación entre el fin del primer evento y el inicio del siguiente es inferior a un umbral crítico establecido ($t_{max} = 1.50$ s) y si el nivel de potencia intermedio no supera un margen de recuperación predefinido ($A_{margin} = 1$ dB) respecto al nivel basal estacionario de la MLP.

Para modelar la agrupación estocástica descrita por el algoritmo empírico de Collonge, dos eventos de desvanecimiento consecutivos, denotados como j y $j + 1$, se consolidan en un mismo SSE si y solo si cumplen simultáneamente las siguientes condiciones:

$$E_j \cup E_{j+1} \in \text{SSE} \Leftrightarrow \begin{cases} \Delta t_{j,j+1} < t_{max} \\ \min_{t \in (t_{end}^{(j)}, t_{start}^{(j+1)})} A(t) \geq A_{margin} \end{cases} \quad (3.3)$$

Donde las variables y parámetros se definen como:

- E_j y E_{j+1} : Eventos individuales de desvanecimiento consecutivos.
- $\Delta t_{j,j+1} = t_{start}^{(j+1)} - t_{end}^{(j)}$: Es la separación temporal entre el instante de término del evento j ($t_{end}^{(j)}$) y el inicio del evento $j + 1$ ($t_{start}^{(j+1)}$).
- $t_{max} = 1.5$ s: Umbral crítico temporal máximo establecido.
- $A(t)$: Nivel de atenuación intermedio medido respecto al nivel MLP.
- $A_{margin} = 1$ dB: Margen de recuperación predefinido. La condición exige que la atenuación mínima en el intervalo de separación no baje de este margen (es decir, la señal no logra recuperarse completamente hacia el valor de MLP).

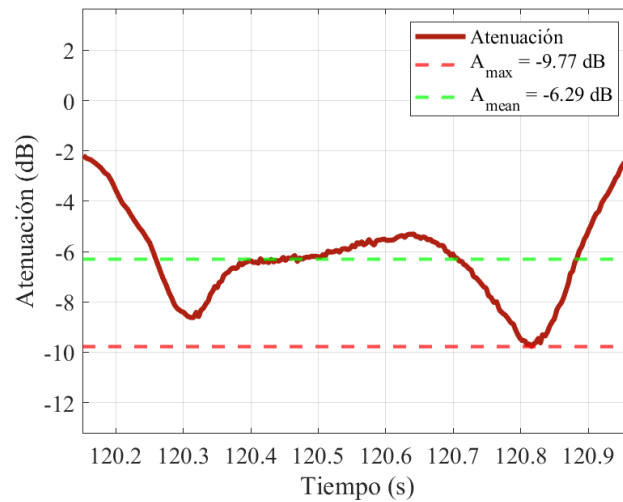


Figura 3.1: Representación gráfica de la ventana temporal de un Evento de Sombra (SE). Se ilustra el perfil de la curva de atenuación junto con la extracción de sus métricas clave: la atenuación máxima detectada (A_{max}) y la atenuación promedio calculada (A_{mean}).

3.2 Interpolación para muestras capturadas a 18 GHz

Dada la diferencia en las tasas de muestreo de los sistemas, es indispensable unificar su resolución temporal. Para alinear los datos y analizar correctamente A_{mean} y A_{max} , se aumenta la tasa de muestreo de la señal de 18 GHz (originalmente a 8 Hz) mediante técnicas de interpolación.

Para este proceso se evaluaron los métodos Spline cúbico y PCHIP. Como ilustra la Figura 3.2, el canal presenta caídas abruptas de potencia. Al aplicar el método Spline, se generan sobreimpulsos y oscilaciones artificiales que superan los mínimos y máximos locales, lo que distorsiona la atenuación física real.

Por el contrario, la interpolación PCHIP preserva la tendencia original de los datos. Este método se ajusta fielmente a las muestras empíricas sin introducir excesos matemáticos, ofreciendo una representación temporalmente densa y físicamente coherente a los datos capturados. En consecuencia, se seleccionó PCHIP como el algoritmo definitivo para el tratamiento de la señal.

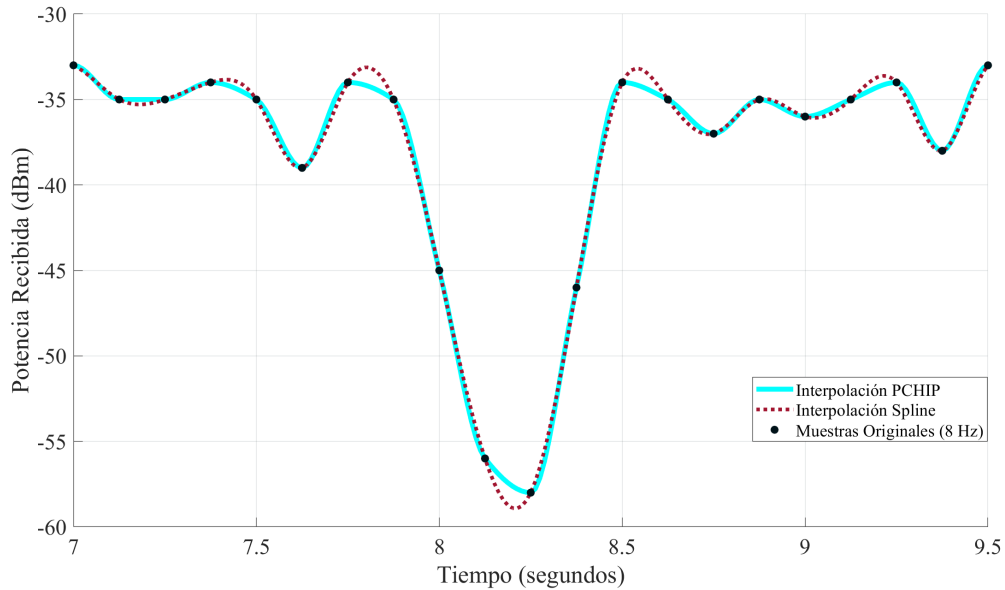


Figura 3.2: Comparativa entre interpolación Spline y PCHIP aplicada a las muestras de potencia recibida a 18 GHz.

Finalmente, la aplicación de este algoritmo permitió incrementar la frecuencia de muestreo original de 8 Hz en un factor de diez, alcanzando una resolución efectiva de 80 muestras por segundo (sps). Sin embargo, esta tasa se encuentra órdenes de magnitud por debajo de los 10 Msps utilizados en el enlace de 2.4 GHz. Esta profunda asimetría temporal constituye una limitante crítica en la medición empírica: mientras el sistema de 2.4 GHz es capaz de capturar variaciones veloces del canal, los datos de 18 GHz, incluso tras la interpolación, restringen el

análisis comparativo exclusivamente a fenómenos de variación más lenta.

3.3 Tasa de indisponibilidad

Para evaluar el impacto del bloqueo peatonal sobre la viabilidad del enlace, se define UR. Esta métrica cuantifica la proporción de tiempo durante el cual el canal de radiofrecuencia se encuentra en estado de interrupción o bloqueo severo.

Matemáticamente, la tasa de indisponibilidad se calcula como la razón entre la suma de las duraciones de todos los SSE y el tiempo total de observación (T_{total}), expresada porcentualmente según la Ecuación 3.4:

$$UR(\%) = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_{SSE}} T_{SSE}(i)}{T_{total}} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

Donde N_{SSE} corresponde al número total de Series de Eventos de Shadowing detectadas mediante el algoritmo de agrupación temporal, $T_{SSE}(i)$ es la duración individual de la i -ésima ráfaga, y T_{total} representa la duración temporal completa de la campaña de medición no controlada.

3.4 Instrumentación y Equipamiento

Para la ejecución de la fase experimental, se utiliza la instrumentación disponible en los laboratorios de la universidad, seleccionando tecnologías que permiten un balance entre precisión y versatilidad en la adquisición de datos. En el caso del enlace de 18 GHz, se dispone de equipos especializados de la familia SAF Tehnika, los cuales facilitan un procesamiento ágil gracias a su software dedicado. No obstante, para efectos de esta investigación, los registros obtenidos se procesan mediante un script de *MATLAB* diseñado para caracterizar la banda de forma específica y extraer con rigor los eventos de desvanecimiento o *shadowing*.

Por otro lado, la medición en la banda de 2.4 GHz presenta desafíos adicionales debido a la falta de analizadores de espectro convencionales que permitan una exportación masiva y directa de datos hacia una computadora, como ocurre con el sistema compacto de SAF. Ante esta limitación, el transceptor ADALM-PLUTO surge como una solución técnica robusta, actuando como un sistema de Radio Definido por Software (SDR) capaz de calcular la Transformada Rápida de Fourier (FFT) de la señal recibida. Esta arquitectura permite el procesamiento veloz de las muestras a través de las librerías de *MATLAB*.

Tabla 3.1: Comparativa del equipamiento técnico e instrumentación utilizado para las bandas de 18 GHz y 2.4 GHz.

Componente / Característica	Banda de 18 GHz	Banda de 2.4 GHz
Transmisor (TX)	SAF <i>SG Compact</i> (P/N JOSSAG13)	Generador de señales Agilent N5182A
Receptor (RX) / Adquisición	SAF <i>Spectrum Compact</i> (P/N JOSSAP53)	Transceptor ADALM-PLUTO SDR
Tipo de Antena	Bocina cónica (<i>Horn</i>) JOAA1724HG01	Parche (<i>Patch</i>) HG2409PCR
Ganancia Nominal	21 dBi	8 dBi
Software de Control	Software dedicado de SAF	<i>MATLAB (Communications Support Package)</i>
Procesamiento de Datos	<i>MATLAB</i>	<i>MATLAB</i>

Tabla 3.2: Comparación de equipos de medición RF.

Característica	SAF <i>Spectrum Compact</i>	ADALM-PLUTO SDR
Rango Frecuencia	16 GHz – 26.5 GHz	325 MHz – 3800 MHz
Piso de Ruido	-105 dBm	-175 dB/Hz
Potencia Máx. Entrada	0 dBm	+2.5 dBm
Frecuencia Muestreo	7.58 sps (Medida)	10 Msps

3.5 Diseño del Enlace Inalámbrico

El montaje experimental se ha diseñado para emular la interacción cotidiana de un usuario con terminales móviles, estableciendo una topología que asegure la repetibilidad de los cruces. Para este propósito, se define una altura del transmisor (h_{TX}) de 2 m y una altura del receptor (h_{RX}) de 1.2 m, simulando la posición estándar de un dispositivo sujetado por una persona de estatura promedio. Con una separación horizontal de 5 m, la distancia euclidiana en línea de vista (D_e) resulta en aproximadamente 5.06 m.

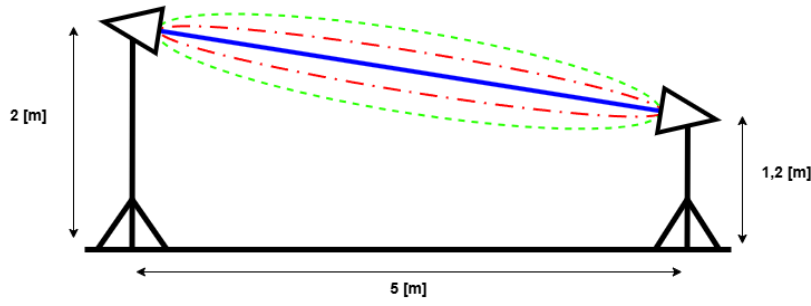


Figura 3.3: Diagrama de enlaces a 2.4 y 18 GHz

3.5.1 Análisis de la Primera Zona de Fresnel y Campo Lejano

La caracterización de la primera zona de Fresnel (R_1) es fundamental en este estudio, no para evitar obstrucciones, sino para dimensionar el volumen de bloqueo necesario que garantice la interrupción de LoS. Calculando R_1 en el punto medio del enlace, se obtienen radios de 0.4 m para la banda de 2.4 GHz y de 0.15 m para 18 GHz. Esta diferencia subraya la mayor sensibilidad del enlace de microondas ante obstáculos pequeños.

Simultáneamente, se ha verificado que las mediciones se realicen en la región de campo lejano o de Fraunhofer (d_f), asegurando frentes de onda planos sobre las aperturas de las antenas. Para la antena patch HG2409PCR, la distancia mínima es de 0.42 m, mientras que para la antena horn JOAA1724HG01, el límite se sitúa en 3.08 m. Dado que $D_e > d_f$ en ambos casos, se valida la integridad geométrica del enlace.

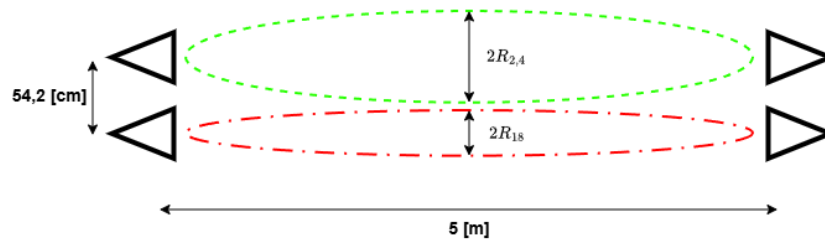


Figura 3.4: Radios de la primera zona de Fresnel. Color rojo para 18 GHz y verde para 2.4 GHz.

Los valores calculados para la configuración del enlace se resumen en las Tablas 3.3, 3.4 y 3.5. Estas tablas consolidan los criterios de diseño que aseguran la validez de las mediciones en campo lejano y cuantifican la diferencia de resolución espacial entre ambas bandas mediante el análisis de la primera zona de Fresnel.

Tabla 3.3: Parámetros geométricos del montaje experimental.

Parámetro	Símbolo	Valor
Altura del Transmisor (Tx)	h_{TX}	2 m
Altura del Receptor (Rx)	h_{RX}	1.2 m
Separación Horizontal	d_h	5 m
Distancia Euclidiana (LOS)	D_e	5.06 m
Ángulo de Inclinación	θ	9.1 °

Tabla 3.4: Comparativa de parámetros de propagación y difracción.

Descripción	Unidad	Banda 2.4 GHz	Banda 18 GHz
Frecuencia de Operación (f)	GHz	2.4	18
Longitud de Onda (λ)	mm	125	16.7
Radio 1ra Zona de Fresnel (R_1)	m	0.4	0.15
Pérdida por Trayectoria (FSPL)	dB	54.14	71.65

Tabla 3.5: Límites de la región de Fraunhofer (Campo Lejano).

Componente	Banda	Dist. de Fraunhofer (d_f)	Estado ($D_e > d_f$)
Patch HG2409PCR	2.4 GHz	0.42 m	Cumple
Horn JOAA1724HG01	18 GHz	3.08 m	Cumple

3.5.2 Balances de Potencia y Niveles de Seguridad

El balance de potencia se ha configurado para equilibrar dos objetivos críticos: mantener un margen dinámico suficiente para capturar desvanecimientos profundos de hasta 40 dB y proteger la integridad física de los receptores. Considerando las FSPL de 54.14 dB y 71.65 dB para cada banda, se ha determinado transmitir una potencia de 0 dBm.

Como se observa en la Tabla 3.6, este nivel de transmisión resulta en potencias de recepción estimadas de -33.14 dBm para el ADALM-PLUTO y -24.65 dBm para el SAF Spectrum Compact. Estos valores son seguros, pues se sitúan por debajo de los límites de saturación de los equipos y, a la vez, ofrecen un margen superior a los 30 dB respecto al piso de ruido, permitiendo una parametrización precisa de la profundidad máxima y la duración temporal de los SE.

Tabla 3.6: Balance de potencia para una distancia de 5,06 m y $P_{TX} = 0$ dBm.

Parámetro	Enlace 2.4 GHz	Enlace 18 GHz
Antena	Patch HG2409PCR	Horn JOAA1724HG01
Ganancia Total ($G_{TX} + G_{RX}$)	16 dBi	42 dBi
Pérdida FSPL	54.14 dB	71.65 dB
Potencia Recibida (P_{RX})	-38.15 dBm	-29.65 dBm

3.6 Caracterización y Calibración del Sistema

Con el objetivo de aislar las pérdidas intrínsecas del hardware (atenuación en cables SMA, desadaptación de impedancias y factores de acoplamiento internos del SDR) de las pérdidas por trayectoria, se llevó a cabo un proceso de calibración riguroso dentro de la cámara anecoica de la universidad. Este entorno controlado garantiza la ausencia de reflexiones electromagnéticas externas e interferencias de co-canal, permitiendo caracterizar la constante de pérdida del sistema (L_{sys}).

3.6.1 Calibración del Sistema SDR (2.4 GHz)

Para la banda de 2.4 GHz, se dispusieron las antenas patch alineadas a una altura constante de 1.6 m, operando con una señal portadora continua (CW) de 0 dBm transmitida por el generador de señales N5182A. Se utilizan exactamente los mismos cables coaxiales SMA destinados a la campaña de medición para asegurar la validez de las pérdidas estimadas.

El procedimiento contempló el registro de una duración de 2 minutos de la recepción de potencia en cámara anecoica. Una vez extraídos los datos, se calcula el MLP del tiempo de grabación total.

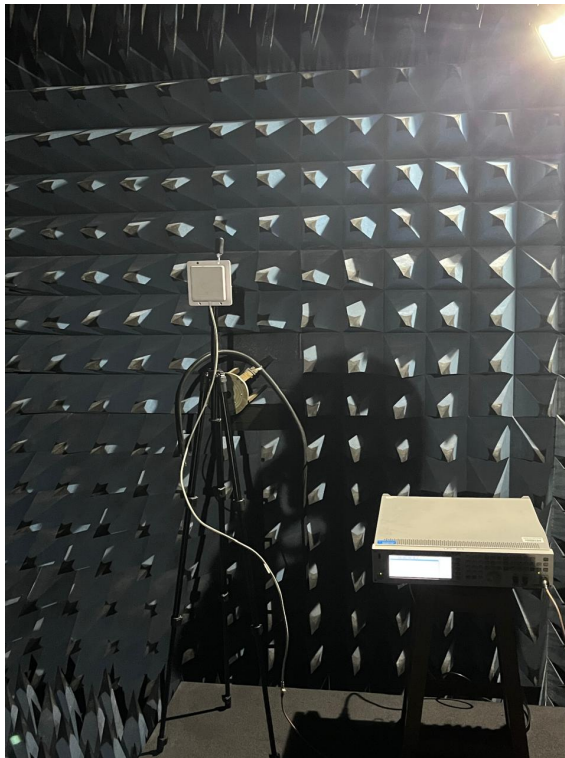
$$MLP_{2.4} = -41.95 \text{ dBm} \quad (3.5)$$

Posteriormente, se calcula el balance del enlace para la potencia de recepción utilizando las pérdidas en el espacio libre detalladas en la Tabla 3.7, resultando en una potencia teórica de -33.6 dBm. A partir de esto, las pérdidas del sistema se determinan como la diferencia entre la potencia teórica y el MLP experimental, obteniendo un valor de 8.35 dB.

Al aplicar esta atenuación adicional a la distancia de la campaña de medición, se estima una potencia de recepción de -46.49 dBm. Este nivel se establecerá como la referencia de potencia (0 dB de atenuación relativa) para la identificación y análisis de los eventos de shadowing en la banda de 2.4 GHz.

Tabla 3.7: Resumen del presupuesto de enlace y pérdidas en exceso para una frecuencia de 2.4 GHz.

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción / Relación
MLP Experimental Medido	-41.95	dBm	Nivel de referencia medido (P_{ref} a 3 m)
FSPL Teórico (3 m)	49.60	dB	Pérdidas en espacio libre calculadas a 3 m
Pérdidas del Sistema (L_{sys})	8.35	dB	$P_{r,\text{teórica}} - \text{MLP}$
Potencia de Rx Esperada (5.06 m)	-46.49	dBm	$P_{r,\text{teórica}}(5.06 \text{ m}) - L_{\text{sys}}$



(a) Sistema transmisor.



(b) Sistema receptor.

Figura 3.5: Montaje experimental para el proceso de calibración en cámara anecoica del enlace de 2.4 GHz.

3.6.2 Calibración del Sistema de 18 GHz

Para el enlace de 18 GHz, se aplicó el mismo procedimiento de calibración en la cámara anecoica, ajustando la configuración dada la alta directividad de las antenas horn. El montaje se estableció con una separación lineal de 3.1 m a una altura de 1.6 m.

La captura experimental registró 1064 muestras durante 140.4 s. A partir de estos datos, se

obtuvo su MLP para mitigar las variaciones rápidas. Con este valor de referencia, se calculó el balance del enlace considerando las pérdidas por espacio libre a la distancia de calibración y la ganancia combinada de las antenas de bocina ($G_{TX} + G_{RX} = 42 \text{ dBi}$). Al contrastar la potencia teórica ideal con el MLP medido, se lograron aislar las pérdidas del sistema SAF Tehnika, correspondientes al acoplamiento, conectores y guías de onda.

Posteriormente, considerando este exceso de atenuación y asumiendo una potencia de transmisión de 0 dBm, se proyectó la potencia de recepción esperada bajo condiciones de línea de vista directa para la distancia euclidiana del escenario real ($D_e = 5.06 \text{ m}$). Los resultados de esta progresión se resumen en la Tabla 3.8.

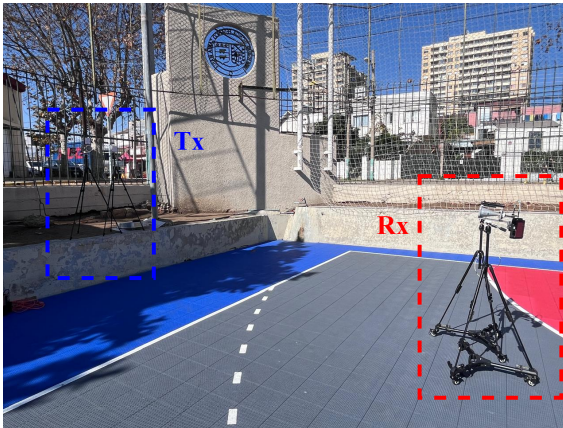
Tabla 3.8: Resumen del presupuesto de enlace y pérdidas en exceso para la banda de 18 GHz.

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción / Relación
MLP Experimental Medido	-29.31	dBm	Nivel estacionario medido (P_{ref} a 3.1 m)
FSPL Teórico (3.10 m)	67.39	dB	Pérdidas en espacio libre a distancia de calibración
Pérdidas del Sistema (L_{sys})	3.92	dB	$P_{r,\text{teórica}} - \text{MLP}$
Potencia de Rx Esperada (5.06 m)	-33.57	dBm	$P_{r,\text{teórica}}(5.06 \text{ m}) - L_{\text{sys}}$

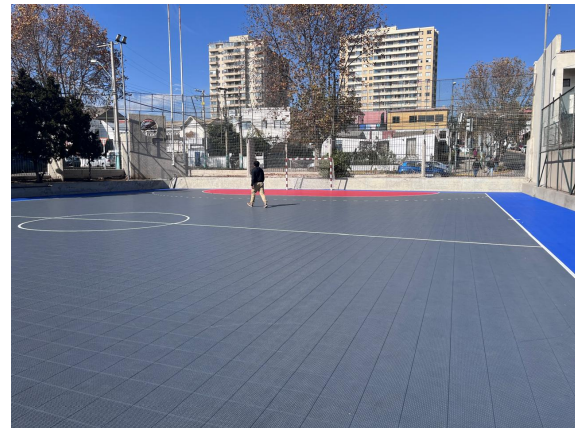
3.7 Campaña de Medición

La campaña de medición se llevó a cabo en un escenario semi-outdoor, emplazado específicamente en una de las esquinas de la multicancha deportiva de la Universidad Técnica Federico Santa María, Sede Casa Central. La disposición física del entorno y el montaje de los equipos se ilustran en la Figura 3.6. La superficie terrestre de propagación está constituida por una base de hormigón recubierta por baldosas modulares entrelazadas de polipropileno perforado, visibles en la figura 3.8a. Cada recuadro presenta dimensiones geométricas exactas de $25 \times 25 \text{ cm}$, retícula física que fue utilizada como una cuadrícula de calibración espacial in situ. Esto permitió establecer la distancia de separación horizontal entre los terminales de transmisión y recepción en exactamente 5 metros, correspondientes a una alineación ininterrumpida de 20 baldosas. Como característica geométrica crítica del entorno, los equipos de medición se dispusieron transversalmente en una intersección perimetral del recinto (figura 3.6a). Este límite está conformado por un muro bajo de contención y gruesos pilares estructurales de concreto sólido, sobre los cuales se erige un cierre de malla metálica. Desde la perspectiva de propagación de RF, esta topología de esquina conforma una barrera dieléctrica de alta densidad que actúa como un reflector electromagnético de gran magnitud. La combinación del

hormigón estructural y el enrejado metálico confina la energía radiada, generando un entorno severamente rico en multitrayecto (multipath-rich channel).



(a) Montaje transversal del enlace en la esquina confinada por muros de concreto y rejas.



(b) Vista general de la superficie modular de polipropileno y delimitación de la cancha.

Figura 3.6: Escenario empírico de medición en la multicancha deportiva de la Sede Casa Central.

3.7.1 Equipamiento y Geometría del Enlace

La configuración geométrica de los terminales Tx y Rx se diseñó para evaluar simultáneamente las frecuencias de 2.4 GHz y 18 GHz. Se estableció una separación vertical empírica de 50 cm entre las antenas de 2.4 GHz y 18 GHz, en contraste con los 54.2 cm calculados teóricamente (calculados en la figura 3.4) para evitar la intersección de sus primeras zonas de Fresnel en el diámetro máximo. Esta decisión se fundamenta en que, al operar en bandas de frecuencia disjuntas y carecer las antenas de ganancia en la banda opuesta, se asume una nula interferencia mutua entre los enlaces, permitiendo un montaje más compacto.

3.7.2 Metodología de Eventos Controlados (Casos $N = 1$ a $N = 5$)

Para aislar y caracterizar matemáticamente el efecto acumulativo del bloqueo humano, se ejecutó una serie de mediciones paramétricas incrementando secuencialmente el número de peatones en la línea de vista. Se definen cinco escenarios de medición, desde el Caso 1 hasta el Caso 5 ($N = 1, \dots, 5$), donde N representa la cantidad simultánea de sujetos cruzando el enlace. Para cada caso, se contabilizaron 30 cruces exitosos por LoS.

Participaron cinco voluntarios cuyas estaturas son 1.62 m, 1.67 m, 1.71 m, 1.78 m y 1.78 m. Para estandarizar el nivel de bloqueo transversal, los sujetos se dispusieron en carriles paralelos al enlace, ordenados estrictamente de menor a mayor estatura partiendo desde la antena receptora. El primer sujeto se ubicó a una distancia de 80 cm de la antena Rx, manteniendo una separación lateral constante de 80 cm entre cada peatón sucesivo.

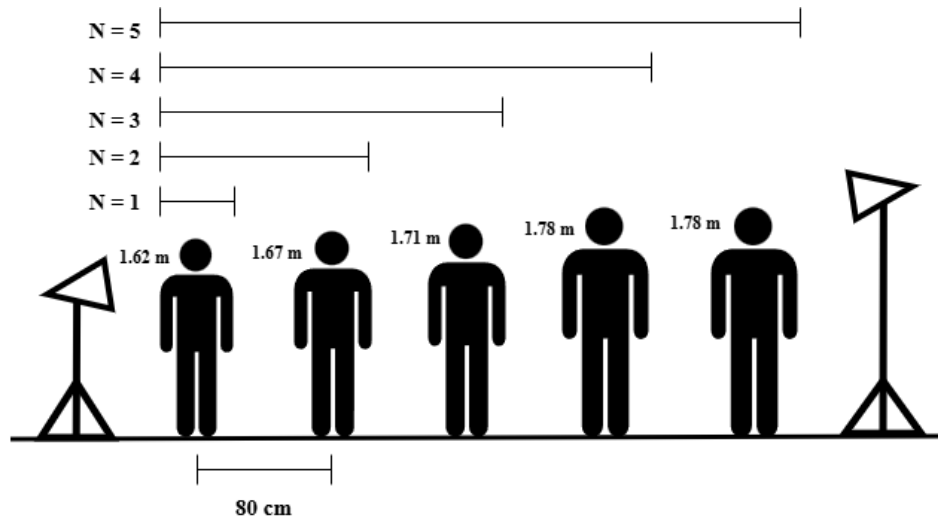


Figura 3.7: Configuración experimental y metodología para escenarios controlados de bloqueo por cuerpo humano ($N=1, \dots, 5$).

Para garantizar que los sujetos atravesaran completamente las zonas de Fresnel de manera ortogonal y sincronizada, se demarcaron rendijas de trayecto sobre la retícula de la cancha. Esta delimitación consistió en 4 marcas físicas equidistantes, separadas por 50 cm entre sí (figura 3.8a). El control de la velocidad de cruce se gestionó mediante estímulos auditivos, utilizando un metrónomo conectado a un altavoz que emitía una pulsación exacta cada segundo (1 Hz). Se instruyó a los participantes a pisar una marca por cada pulso acústico, logrando de forma efectiva una velocidad de cruce controlada y constante de $v = 0.5$ m/s, tal como se esquematiza topológicamente en la figura 3.8b. La ejecución práctica de esta sincronía, ejemplificada durante el Caso 4 ($N = 4$), se documenta en la figura 3.9a.

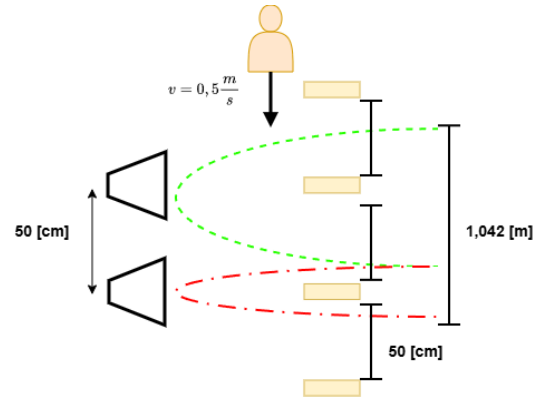
3.7.3 Metodología de Tráfico Aleatorio

Para complementar el análisis controlado de los cruces, se diseñó un escenario de entorno no controlado. En esta fase, se registró una grabación continua de 10 minutos bajo condiciones de tráfico peatonal aleatorio. Se instruyó a los participantes a transitar a través de la línea de vista con trayectorias, formaciones y velocidades completamente libres, emulando la dinámica natural y el efecto de agrupamiento (clustering) propio de un recinto de alto tránsito.

El procesamiento digital de las caídas de potencia en este escenario se abordó mediante un algoritmo de agrupación por ventana temporal estática. Con base en la literatura estándar, todo evento de desvanecimiento que ocurriera con una separación temporal menor a 1.5 s respecto al evento precedente fue consolidado dentro de una única ráfaga continua SSE.



(a) Delimitación de las rendijas de trayecto con marcas cada 50 cm.



(b) Diagrama cruce de peatones: Zonas de Fresnel, marcas y velocidad del peatón (0.5 m/s).

Figura 3.8: Configuración geométrica y delimitación del escenario de medición para eventos de sombra.



(a) Ejecución práctica de cruce sincronizado correspondiente al Caso 4 ($N = 4$).



(b) Ejecución práctica del experimento para dinámicas de cruces aleatorios.

Figura 3.9: Metodología de ejecución para los escenarios de medición con movimiento de peatones de forma controlada y estocástica.

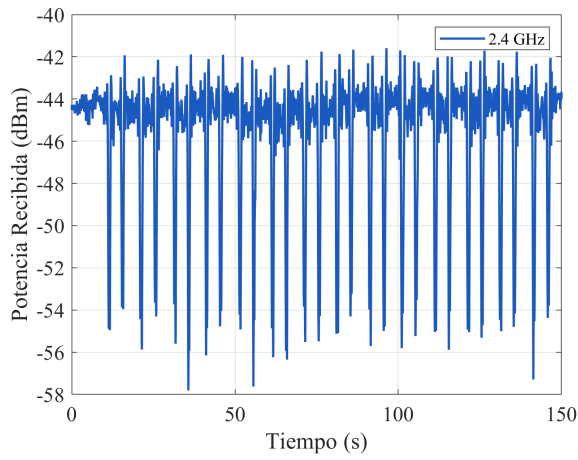
Capítulo 4

Resultados y Análisis

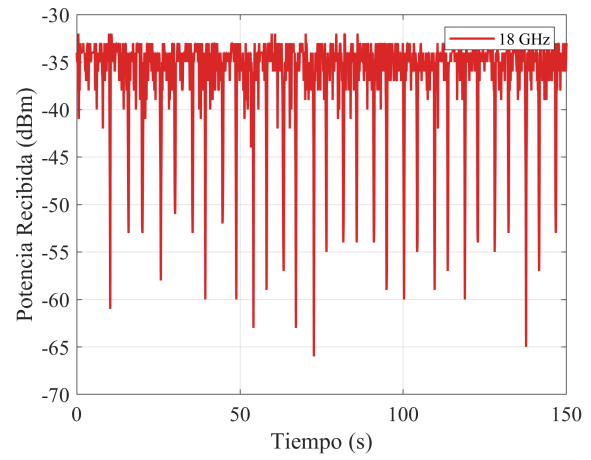
El presente capítulo expone los resultados obtenidos tras el procesamiento de los datos adquiridos en la campaña de medición. El análisis se divide en dos enfoques fundamentales: en primer lugar, la evaluación de la atenuación aislada mediante cruces controlados, cuyo fin es aislar el efecto del bloqueo humano; y en segundo lugar, la caracterización del canal bajo condiciones de tráfico peatonal aleatorio mediante el análisis de los SSE.

Para comprender la naturaleza del bloqueo humano y garantizar la validez de la extracción estadística, resulta fundamental observar el comportamiento de la señal desde su adquisición. A modo ilustrativo, la figura 4.1a y 4.1b presenta los datos en bruto (raw data) de la potencia recibida a 2.4 GHz y 18 GHz respectivamente, donde cada valle pronunciado corresponde a un cruce peatonal por la línea de vista.

Con el objetivo de aislar exclusivamente la pérdida por inserción humana, las señales fueron normalizadas restando su valor de MLP obtenida del escenario en condición LoS, transformando el registro a atenuación relativa. Las figuras 4.2a y 4.2b exponen las grabaciones normalizadas correspondientes al Caso 1 para las bandas de 2.4 GHz y 18 GHz, respectivamente. Sobre estas curvas de atenuación relativa se aplicó un algoritmo de detección definiendo un umbral de -2 dB para el inicio y fin de cada evento de atenuación. Finalmente, para aislar el bloqueo del cuerpo humano y descartar caídas espurias de potencia asociadas al ruido térmico o dispersión rápida del canal, se aplicó un filtro temporal estricto: se descartaron todas aquellas caídas con duraciones inferiores a 700 ms en la banda de 2.4 GHz, y menores a 200 ms en la banda de 18 GHz.

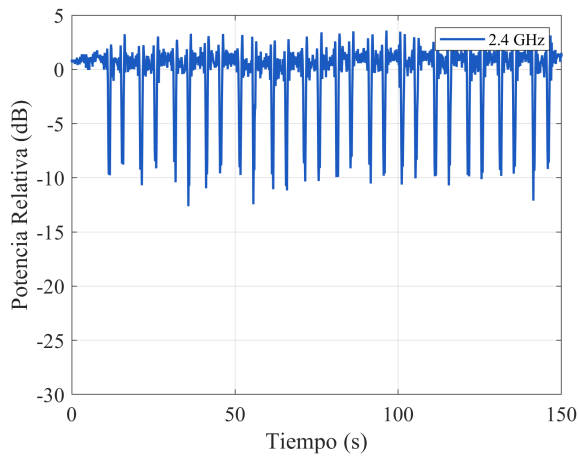


(a) Perfil temporal de potencia recibida en el enlace de 2.4 GHz.

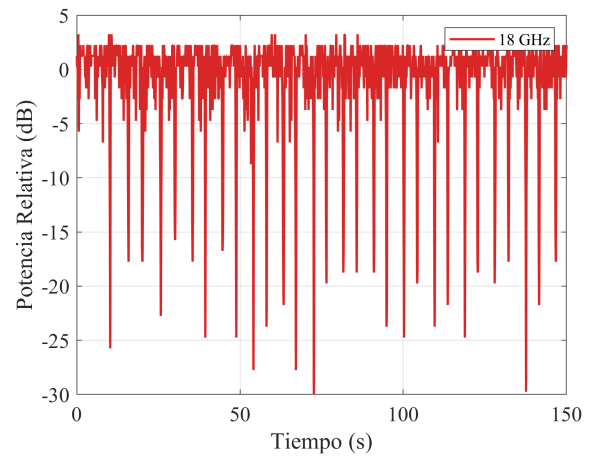


(b) Perfil temporal de potencia recibida en el enlace de 18 GHz.

Figura 4.1: Visualización de los datos en bruto (*raw data*) adquiridos durante la campaña de medición a 2.4 GHz (a) y 18 GHz (b).



(a) Atenuación relativa a 2.4 GHz.



(b) Atenuación relativa a 18 GHz.

Figura 4.2: Perfiles de atenuación normalizada respecto a la Potencia Local Media (MLP) para el escenario de un cruce peatonal ($N = 2$) en enlace de 2.4 GHz (a) y 18 GHz (b).

4.1 Análisis de Eventos Controlados: Efecto Acumulativo de Peatones

La Figura 4.3 ilustra el perfil temporal de atenuación para eventos sincronizados en ambas frecuencias, contrastando el caso de un cruce individual ($N = 1$) frente al escenario de agrupamiento máximo evaluado ($N = 5$).

Como se observa en la Figura 4.3a, el desvanecimiento provocado por un solo peatón presenta un comportamiento distinto según la frecuencia de operación. A 2.4 GHz (curva azul), la atenuación describe un valle más ancho y con una morfología particular: justo en el centro de la ventana temporal de atenuación, la potencia de recepción experimenta una leve recuperación,

para luego volver a caer a valores cercanos a la atenuación máxima anterior. En contraste, a 18 GHz (curva roja), la caída es abrupta, aguda y considerablemente más profunda. Esto se debe a que el cuerpo humano bloquea la totalidad del elipsoide de Fresnel, sumado a la menor capacidad de penetración que presentan las ondas de frecuencias superiores frente a obstáculos físicos.

Al someter el enlace al cruce simultáneo de cinco peatones (Figura 4.3b), ambas señales experimentan un ensanchamiento temporal del desvanecimiento debido al aglomeramiento y a la desincronización de los individuos. Sin embargo, la banda de 18 GHz experimenta un bloqueo severo, con niveles de atenuación que superan los 30 dB, mientras que la banda de 2.4 GHz logra mantener un nivel de atenuación menor gracias a las componentes de propagación multitrayecto presentes en el entorno.

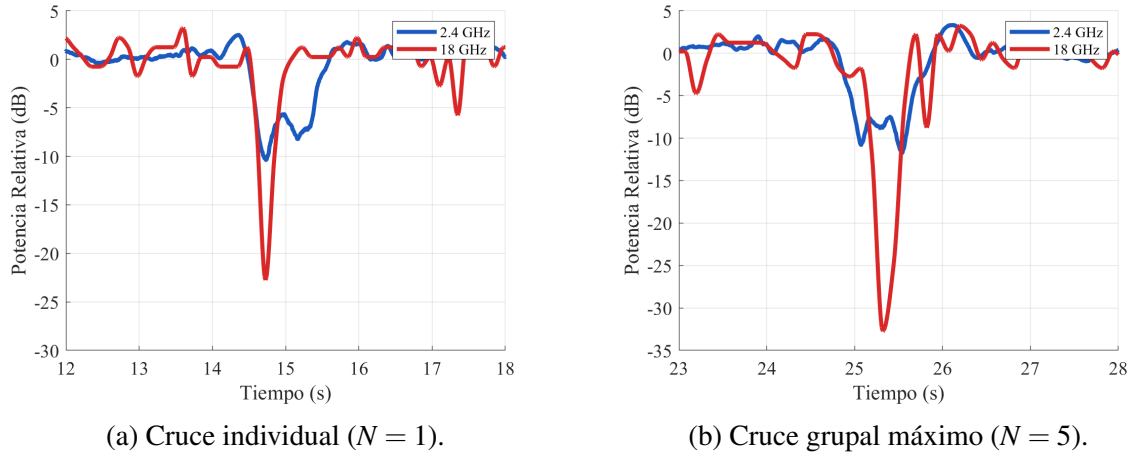


Figura 4.3: Morfología comparativa del desvanecimiento temporal entre 2.4 GHz y 18 GHz para eventos de cruce peatonal sincronizados.

4.1.1 Análisis de la atenuación máxima y media para eventos controlados

Con el objetivo de llevar a cabo una caracterización estadística del impacto producido por el bloqueo humano, se procede a extraer tres métricas fundamentales para cada evento de cruce registrado: A_{max} , A_{mean} y T . A partir de este conjunto de datos, se calcularon las CDFs empíricas para cada caso y frecuencia.

En la Tabla 4.1 se presentan los datos extraídos de las CDFs presentes en las figuras 4.5, 4.6 y 4.7. De acuerdo con la literatura y los hallazgos reportados en [25], se anticipaba que a partir de un escenario con tres peatones ($N = 3$) el canal de propagación alcanzara un estado de saturación por bloqueo, no registrando incrementos significativos en la atenuación para densidades mayores.

Tabla 4.1: Análisis de atenuación y duración en escenarios controlados para el Percentil 90.

Personas (N)	Banda 2.4 GHz			Banda 18 GHz		
	A_{max} (dB)	A_{mean} (dB)	Duración (ms)	A_{max} (dB)	A_{mean} (dB)	Duración (ms)
1	11.48	6.98	883.14	21.25	12.89	450
2	11.64	7.4	869.89	27.75	15.63	543.75
3	14.5	8.82	967.11	30.75	17.64	568.75
4	16.67	9.72	1066.15	32.75	18.34	575
5	13.96	8.82	1050.44	31.75	18.92	700

Tabla 4.2: Análisis de diferencias (Δ) consecutivas de atenuación según el número de peatones (N) para el Percentil 90.

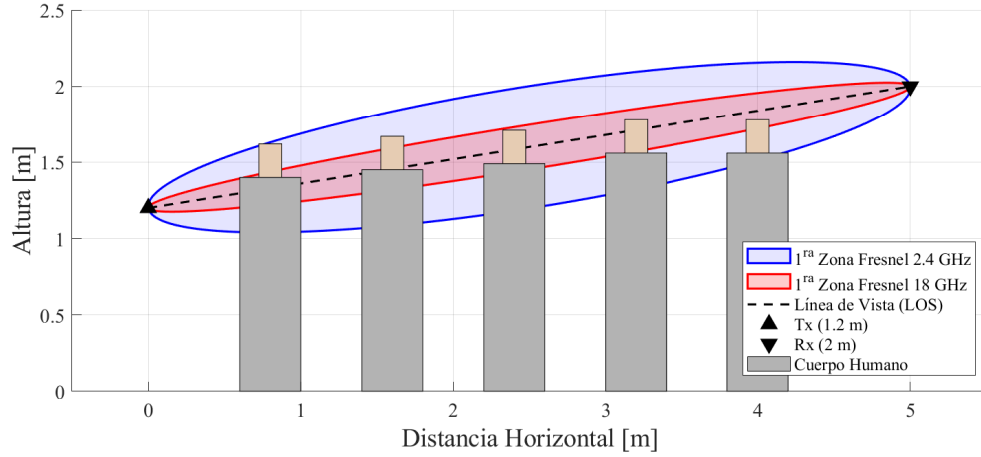
Comparación	Banda 2.4 GHz		Banda 18 GHz	
	ΔA_{max} (dB)	ΔA_{mean} (dB)	ΔA_{max} (dB)	ΔA_{mean} (dB)
Δ 2-1	0.16	0.42	6.5	2.74
Δ 3-2	2.86	1.42	3	2.01
Δ 4-3	2.17	0.9	2	0.7
Δ 5-4	-2.71	-0.9	-1	0.58

Sin embargo, un análisis detallado de las diferencias consecutivas presentadas en la Tabla 4.2 revela un comportamiento divergente entre ambas frecuencias de estudio. Específicamente para 2.4 GHz, el menor incremento de atenuación se observa en el intervalo Δ 2-1, tanto para A_{mean} como para A_{max} , mientras que los aumentos más pronunciados de pérdida se registran en las transiciones Δ 3-2 y Δ 4-3.

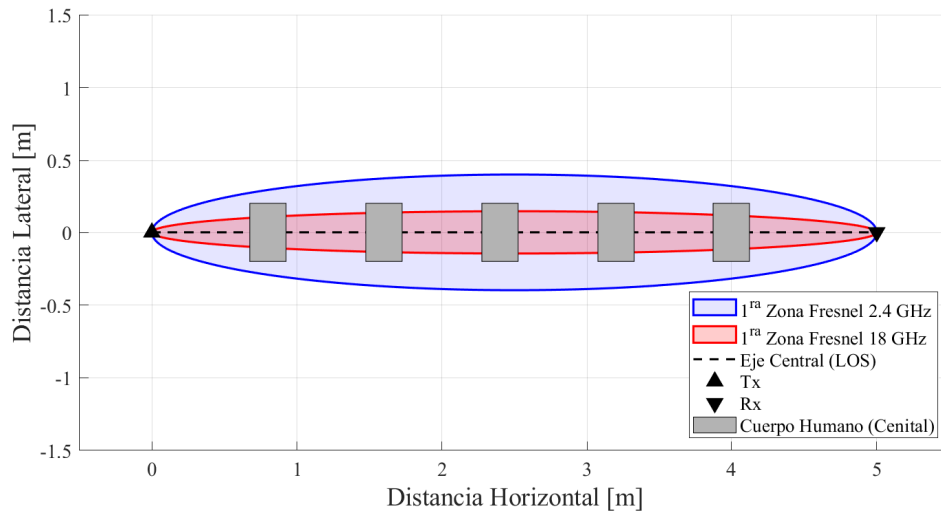
El hecho de que pasar de una a dos personas bloqueando el enlace no incremente las pérdidas de manera significativa se atribuye a que persisten componentes de multirayecto que no son obstruidas ni atenuadas en su totalidad. Como se ilustra en la vista cenital de la Figura 4.4b, el ancho de un cuerpo humano no bloquea por completo el elipsoide de Fresnel. Por consiguiente, la alineación de una segunda persona no añade un área de bloqueo transversal sustancial respecto a la primera. No obstante, a medida que se incorporan más peatones y aumentan los periodos de obstrucción, la desincronización natural en sus movimientos genera un efecto acumulativo. En conjunto, actúan como un obstáculo dinámico de mayor envergadura que bloquea una proporción más amplia del elipsoide.

Finalmente, resulta de particular interés el escenario al agregar a la quinta persona ($N = 5$), donde los valores de A_{mean} y A_{max} disminuyen, resultando en una diferencia negativa respecto

al caso anterior ($N = 4$). Este fenómeno contraintuitivo se atribuye a la compleja dinámica del multitrayecto: el quinto obstáculo puede estar introduciendo nuevas componentes difractadas que llegan al receptor en fase (interferencia constructiva), o bien, puede estar bloqueando rayos que previamente llegaban con un desfase cercano a 180° , mitigando así la interferencia destructiva que padecía el enlace.



(a) Vista lateral del enlace.



(b) Vista cenital del enlace.

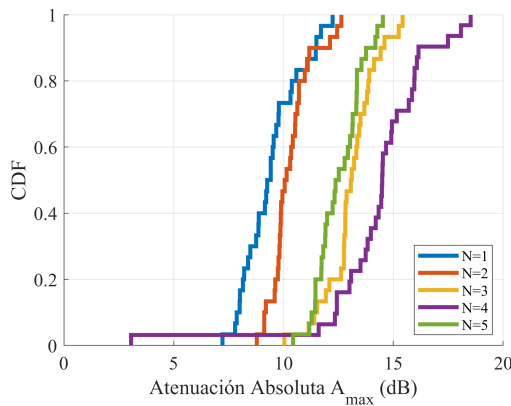
Figura 4.4: Simulación geométrica de la primera zona de Fresnel bajo condiciones de bloqueo.

Por el contrario, la banda de 18 GHz exhibe un comportamiento acorde con la hipótesis

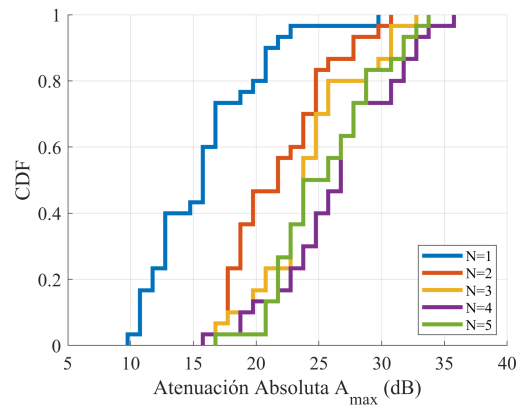
inicial. Debido a su longitud de onda centimétrica, su primera zona de Fresnel es sumamente estrecha ($R_1 = 15$ cm en el centro y reducida a escasos centímetros cerca del receptor). En este escenario, el haz de energía está tan confinado que la presencia de la primera persona (ubicada a 80 cm) es físicamente suficiente para obstruir de forma casi absoluta la línea de vista, alcanzando de manera prematura el punto de saturación del canal.

Finalmente, resulta de particular interés la inversión de tendencia observada en ambas bandas para la transición $\Delta 5-4$, donde las diferencias de atenuación adquieren valores negativos. Este fenómeno responde a una combinación de factores. Por un lado, la compleja dinámica del multitrayecto detallada anteriormente puede generar interferencia constructiva al introducir nuevas componentes difractadas o bloquear rayos que llegaban en contrafase. Por otro lado, al densificar el área de trayecto con cinco personas, la aglomeración de cuerpos deja de actuar como un bloque puramente absorbente y comienza a operar de forma colectiva como un entorno dispersor múltiple.

Esta dinámica se corrobora al analizar la duración de los eventos en la Tabla 4.1, donde se aprecia un incremento paulatino en el tiempo de obstrucción a medida que aumenta el número de peatones. A pesar de los recursos tecnológicos implementados para la coordinación del experimento, la sincronización perfecta es inviable en la práctica; este ensanchamiento en las ventanas de tiempo refleja que los participantes no atraviesan el enlace de forma estrictamente simultánea. Asimismo, las discrepancias fisiológicas intrínsecas de cada individuo (tales como la estatura, el ancho de los hombros y el ritmo de zancada) introducen una variabilidad estocástica en el bloqueo. Esto fragmenta la sombra homogénea del obstáculo conjunto, propiciando rendijas dinámicas por las cuales la señal electromagnética logra filtrarse, difractarse y recomponerse en el receptor.



(a) Frecuencia de 2.4 GHz.



(b) Frecuencia de 18 GHz.

Figura 4.5: CDFs empíricas para la atenuación máxima absoluta (A_{max}) bajo cruces peatonales controlados ($N = 1 \dots 5$).

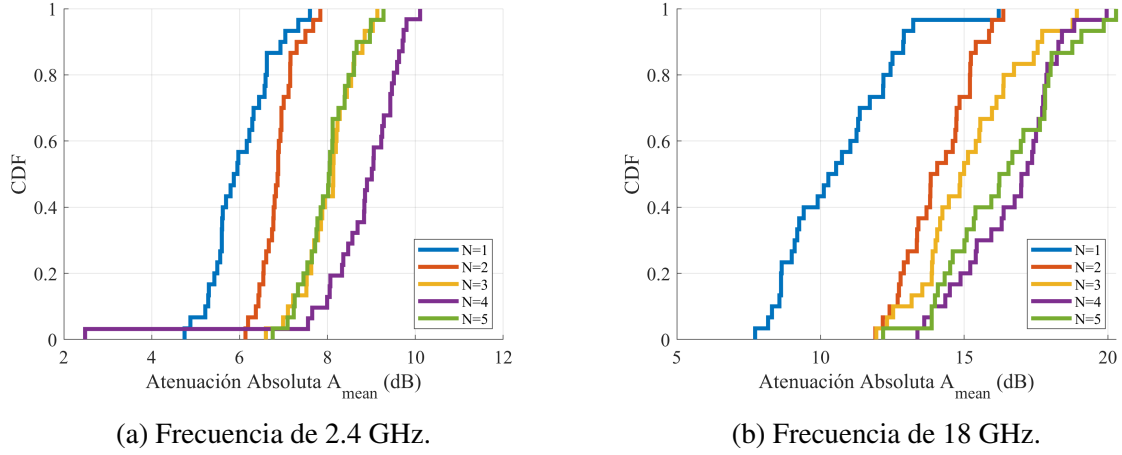


Figura 4.6: CDFs empíricas para la atenuación media (A_{mean}) bajo cruces peatonales controlados ($N = 1 \dots 5$).

4.1.2 Análisis de la duración de eventos de bloqueo en escenarios controlados

El análisis de la duración temporal de los cruces, detallado a través de las distribuciones empíricas en la figura 4.7, revela una dinámica físicamente congruente con la geometría de propagación de cada banda. Al evaluar el percentil 90 para cruces individuales ($N = 1$), el tiempo de desvanecimiento a 2.4 GHz (figura 4.7a) es ostensiblemente mayor (883.14 ms) en comparación con el registrado a 18 GHz (figura 4.7b), el cual se sitúa en 450 ms, asumiendo una velocidad nominal constante del peatón de 0.5 m/s.

Este comportamiento diferenciado está gobernado por el diámetro transversal de la primera Zona de Fresnel en el trayecto de la señal. A la frecuencia de 2.4 GHz, el elipsoide volumétrico es considerablemente amplio, lo que provoca que el cuerpo del peatón comience a perturbar y difractar el campo electromagnético mucho antes de interceptar el eje óptico central del enlace, extendiendo la perturbación hasta que despeja por completo dicho volumen. Por el contrario, a 18 GHz el haz directivo presenta un diámetro sumamente estrecho. El fenómeno de sombra se manifiesta entonces como una interrupción abrupta y de menor extensión temporal, concentrando la pérdida en una ventana de tiempo reducida pero con una magnitud significativamente más destructiva para la integridad del canal.

Al expandir el análisis hacia escenarios con múltiples peatones ($N > 1$), las curvas de la CDF se desplazan hacia la derecha, lo que refleja un incremento en la duración de los bloqueos. Este fenómeno no se debe únicamente al mayor volumen físico del obstáculo humano, sino a la variabilidad en la marcha del grupo. La imposibilidad práctica de mantener un paso perfectamente sincrónico prolonga el tránsito de los usuarios a través del enlace. En consecuencia, los límites de entrada y salida de la Zona de Fresnel se vuelven difusos, extendiendo el tiempo que el sistema permanece atenuado antes de retornar a las condiciones de canal libre.

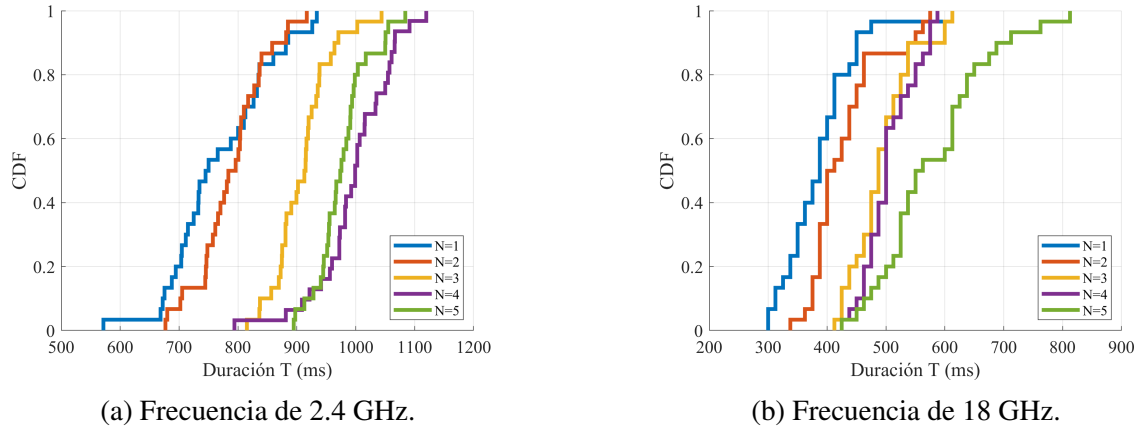


Figura 4.7: Distribución probabilística de la duración temporal (T) de los SE en milisegundos, evidenciando el impacto del radio de la zona de Fresnel.

4.1.3 Modelamiento Predictivo de Atenuación por Densidad Peatonal

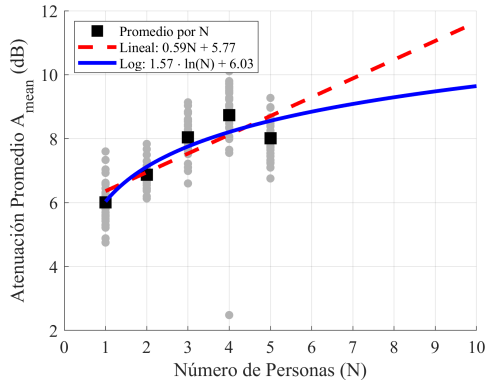
Para caracterizar el comportamiento del canal frente a multitudes y proyectar el impacto de un mayor número de transeúntes bloqueando simultáneamente la línea de vista, se desarrolló un análisis de regresión predictiva a partir de las mediciones de los escenarios controlados ($N = 1$ a 5 personas). Se evaluaron dos enfoques matemáticos: un modelo lineal continuo y un modelo logarítmico, con el fin de extrapolar A_{mean} y A_{max} hasta una densidad teórica de 10 personas.

Los coeficientes obtenidos para ambos ajustes se sintetizan en la tabla 4.3, mientras que la figura 4.8 expone las proyecciones gráficas sobre la dispersión empírica real.

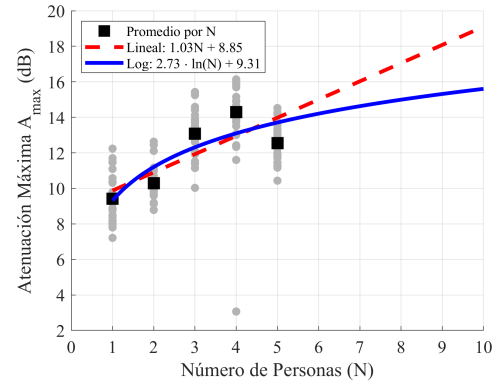
Tabla 4.3: Modelos de regresión predictiva para la atenuación en función del número de personas (N).

Frecuencia	Métrica	Modelo (dB)	Lineal	Modelo Logarítmico (dB)
2.4 GHz	Promedio (A_{mean})	$0.59N + 5.77$		$1.57 \cdot \ln(N) + 6.03$
	Máxima (A_{max})	$1.03N + 8.85$		$2.73 \cdot \ln(N) + 9.31$
18 GHz	Promedio (A_{mean})	$1.41N + 10.32$		$3.77 \cdot \ln(N) + 10.95$
	Máxima (A_{max})	$2.38N + 15.61$		$6.42 \cdot \ln(N) + 16.6$

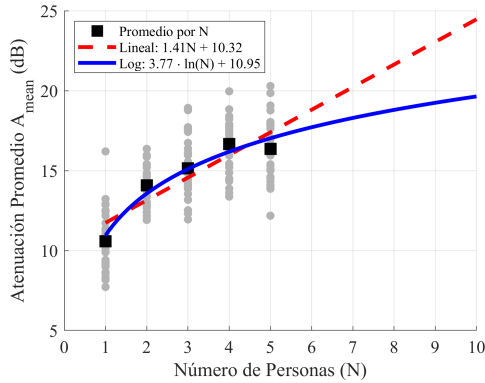
A partir de la proyección visual de la figura 4.8, se constata que el modelo lineal resulta físicamente inviable para predecir aglomeraciones densas ($N > 5$), ya que asume un incremento de pérdidas indefinido que ignora la presencia de trayectorias multicamino y el piso de ruido del receptor. Por el contrario, el modelo logarítmico describe con notable precisión el fenómeno de saturación del canal. A medida que se incorporan más transeúntes, la atenuación marginal aportada por cada individuo adicional decrece, estabilizando el bloqueo total



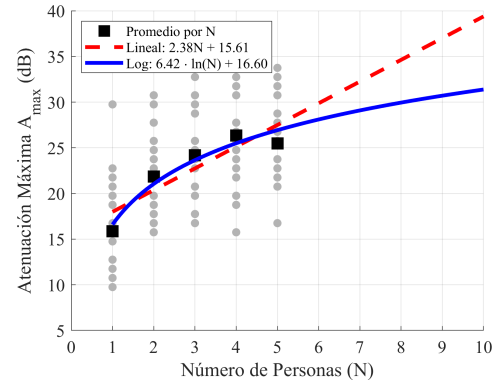
(a) A_{mean} proyectado a 2.4 GHz.



(b) A_{max} proyectado a 2.4 GHz.



(c) A_{mean} proyectado a 18 GHz.



(d) A_{max} proyectado a 18 GHz.

Figura 4.8: Modelos predictivos de atenuación frente a densidad peatonal creciente. Se observa la saturación logarítmica producto del solapamiento de sombras en los escenarios de mayor densidad. Los puntos grises corresponden a las mediciones de A_{max} y A_{mean} por cada caso N.

en una asíntota curva que refleja de manera realista los límites físicos del desvanecimiento en ambas frecuencias.

A pesar de la naturaleza inherentemente estocástica del bloqueo humano, el análisis cuantitativo de la dispersión demuestra que utilizar el promedio de los datos para construir el modelo que represente los valores de A_{mean} presentan una notable estabilidad estadística. Este comportamiento valida la robustez de las curvas logarítmicas obtenidas, confirmando que la tendencia central del canal no se encuentra distorsionada por fluctuaciones descontroladas o ruido instrumental severo. Para caracterizar formalmente esta variabilidad a lo largo de todos los escenarios experimentales, la tabla 4.4 resume el comportamiento de la dispersión mediante el cálculo de la desviación estándar (σ) junto a los valores mínimos y máximos para cada caso de estudio ($N = 1$ a 5).

Tabla 4.4: Análisis estadístico de dispersión para la atenuación promedio (A_{mean}) en función del número de peatones (N).

Frecuencia	Caso N	Media (dB)	Desv. Est. (dB)	Mín. (dB)	Máx. (dB)
2.4 GHz	1	6.01	0.7	4.75	7.6
	2	6.87	0.39	6.13	7.84
	3	8.04	0.6	6.6	9.14
	4	8.74	1.33	2.48	10.11
	5	8.01	0.59	6.76	9.27
18 GHz	1	10.58	1.95	7.72	16.2
	2	14.08	1.2	11.91	16.36
	3	15.15	1.8	11.94	18.92
	4	16.66	1.67	13.37	19.96
	5	16.36	1.99	12.18	20.29

Los resultados expuestos en la tabla 4.4 revelan que la desviación estándar se mantiene de forma consistente por debajo de los 2 dB en ambas frecuencias de operación. En la frecuencia de 2.4 GHz, el valor máximo de σ se registra en el escenario $N = 4$ (1.33 dB), lo cual se atribuye a la mayor aleatoriedad en la superposición de los pasos de los peatones dentro de una Zona de Fresnel físicamente ancha. Por otro lado, la frecuencia de 18 GHz exhibe variaciones dinámicas superiores debido a la alta sensibilidad de las longitudes de onda centimétrica frente a sutiles cambios en la postura corporal de los participantes durante el bloqueo.

Tabla 4.5: Análisis estadístico de dispersión para la atenuación máxima (A_{max}) en función del número de peatones (N).

Frecuencia	Caso N	Media (dB)	Desv. (dB)	Est.	Mín. (dB)	Máx. (dB)
2.4 GHz	1	9.42	1.29		7.21	12.24
	2	10.3	0.92		8.79	12.63
	3	13.08	1.17		10.03	15.43
	4	14.3	2.64		3.07	18.51
	5	12.54	1.02		10.43	14.52
18 GHz	1	15.85	4.54		9.75	29.75
	2	21.85	4.03		15.75	30.75
	3	24.18	4.1		16.75	32.75
	4	26.35	4.8		15.75	35.75
	5	25.48	4.2		16.75	33.75

El análisis estadístico ratifica que A_{mean} es un indicador robusto y representativo de la tendencia del canal gracias a su baja dispersión ($\sigma < 2$ dB). En marcado contraste, la atenuación máxima (A_{max}) exhibe una severa variabilidad estocástica, particularmente a 18 GHz ($\sigma > 4$ dB), producto de desvanecimientos profundos ante bloqueos directos de la línea de vista. Si bien los datos de A_{max} también reflejan el fenómeno de saturación espacial a partir de cuatro peatones ($N \geq 4$), la alta dispersión de las mediciones (observable en la figura 4.8d) limita drásticamente la confiabilidad y utilidad de un ajuste logarítmico convencional. Por consiguiente, se concluye que este enfoque predictivo resulta insuficiente para modelar el peor escenario en altas frecuencias, sugiriéndose fuertemente explorar alternativas metodológicas, tales como modelos empíricos estocásticos o distribuciones de teoría de valores extremos, que sean capaces de caracterizar con el rigor necesario la imprevisibilidad y severidad de las pérdidas en enlaces a 18 GHz.

4.2 Análisis de Tráfico Aleatorio

Para el procesamiento de los datos correspondientes al escenario de tráfico aleatorio, fue necesario realizar un ajuste empírico en la sensibilidad del algoritmo de detección. Específicamente, el umbral de atenuación (A_{margin}) se elevó de -2 dB a -1 dB. Esta modificación se justifica debido a que, bajo condiciones de tránsito libre, las trayectorias y velocidades de los peatones son arbitrarias; en consecuencia, algunos cruces parciales o periféricos a la zona de Fresnel generaban desvanecimientos menos profundos que no lograban ser captados correctamente con el umbral original. Adicionalmente, el filtro temporal para descartar ruido de cuantización o esparcimiento rápido (t_{min}) se fijó en 0.2 s, mientras que la ventana estática para la agrupación de ráfagas (t_{max_sse}) se mantuvo en 1.5 s para ambas frecuencias, tal como

se resume en la tabla 4.6.

Tabla 4.6: Parámetros de detección y agrupación utilizados en el escenario de tráfico aleatorio para ambas bandas de frecuencia.

Parámetro	Descripción	2.4 GHz	18 GHz
A_{margin}	Umbral de detección de sombra (SE)	-1 dB	-1 dB
t_{min}	Filtrado temporal de ruido mínimo	0.2 s	0.2 s
t_{max_sse}	Ventana estática de agrupación (SSE)	1.5 s	1.5 s

En las figuras 4.9 y 4.10 se ilustran los perfiles temporales de la potencia recibida para los enlaces de 2.4 GHz y 18 GHz, respectivamente, bajo el escenario de tráfico peatonal aleatorio. Al contrastar ambas gráficas, se hace evidente que las caídas de potencia son significativamente más profundas y abruptas en la banda de 18 GHz. Asimismo, se observa una mayor varianza o aparente ruido en la señal base de 18 GHz; estas fluctuaciones continuas son atribuibles a la superposición de dos factores: el desvanecimiento rápido a pequeña escala producto de la dispersión dinámica en el entorno, y la firma de cuantización junto al piso de ruido térmico propios de la instrumentación.

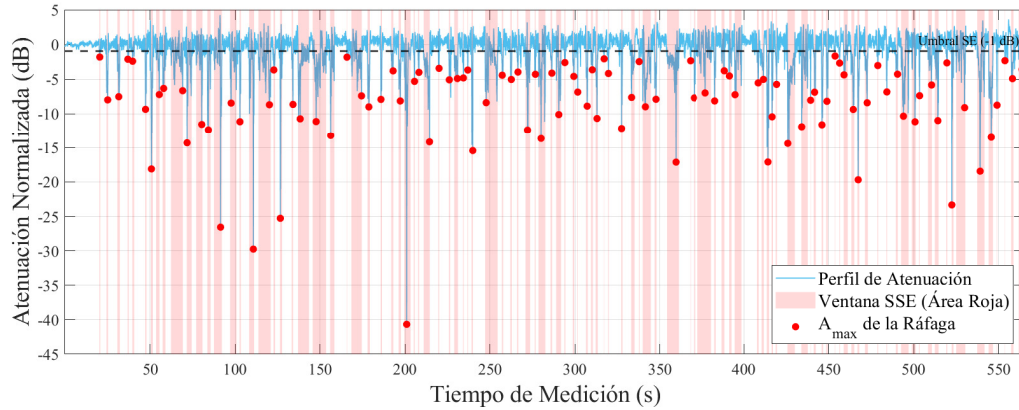


Figura 4.9: Perfil temporal de la potencia recibida en el enlace de 2.4 GHz bajo un escenario de tráfico peatonal aleatorio.

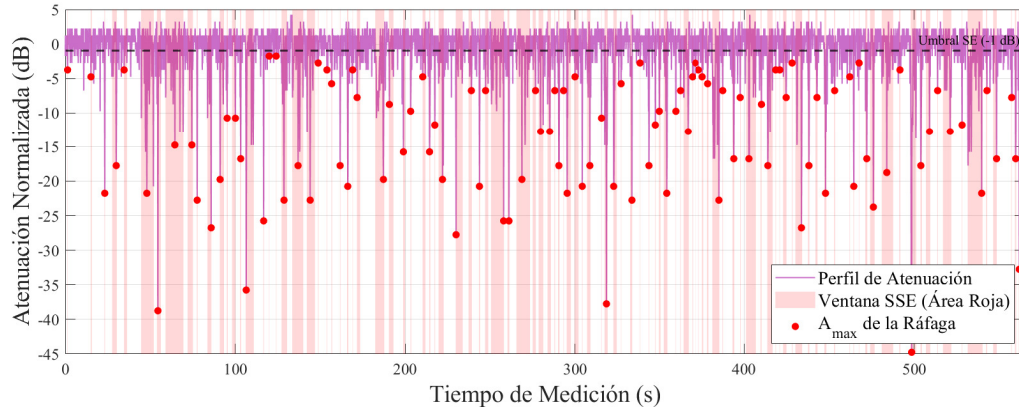


Figura 4.10: Perfil temporal de la potencia recibida en el enlace de 18 GHz bajo un escenario de tráfico peatonal aleatorio.

Los resultados estadísticos tras aplicar el algoritmo de agrupamiento se presentan en la tabla 4.7. Los datos evidencian la alta sensibilidad de la banda de 18 GHz, registrando una mayor cantidad de SE y una atenuación máxima promedio ($\bar{A}_{max}$) más severa respecto a la frecuencia de 2.4 GHz. Este comportamiento obedece directamente al radio de la primera Zona de Fresnel: al ser sustancialmente más estrecho a 18 GHz, el peatón bloquea la totalidad del haz focalizado, pero logra atravesarlo más rápidamente, lo que explica por qué la duración media de las ráfagas SSE es menor en esta frecuencia (1.85 s frente a los 2.06 s de 2.4 GHz). Pese a esta diferencia temporal, la alta recurrencia de los bloqueos lleva a ambas frecuencias a convergir en tasas de indisponibilidad sumamente críticas, superando el 35 % del tiempo total en este escenario de alta densidad.

Tabla 4.7: Resumen comparativo de las Series de Eventos de Shadowing (SSE) bajo condiciones de tráfico peatonal aleatorio de alta densidad.

Métrica Evaluada	2.4 GHz	18 GHz
Potencia Local Media (MLP)	-45.18 dBm	-35.25 dBm
Eventos Individuales (SE) filtrados	200	234
Total de Ráfagas (SSE) detectadas	107	107
Promedio de cruces (SE) por ráfaga	1.9	2.2
Atenuación Máxima Promedio ($\bar{A}_{max}$)	8.78 dB	14.17 dB
Duración Media del SSE	2.06 s	1.85 s
Duración Máxima de un SSE	12.11 s	10.54 s
Tasa de Indisponibilidad (UR)	36.78 %	35.03 %

4.2.1 Modelamiento Empírico de T_{SSE}

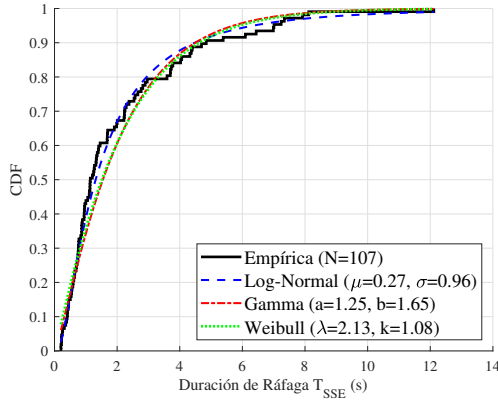
Para consolidar un modelo estocástico que permita simular el canal bajo condiciones dinámicas, se ajustaron tres distribuciones teóricas: Log-Normal, Gamma y Weibull; a la distribución empírica de T_{SSE} . Los resultados correspondientes a las métricas de bondad de ajuste se resumen en la tabla 4.8, mientras que la figura 4.11 presenta la superposición visual de estos modelos respecto a las mediciones obtenidas.

El análisis cuantitativo revela un comportamiento estocástico definido y consistente. Para el enlace de 2.4 GHz, el modelo Log-Normal presenta una mejora estadística: minimiza drásticamente el Criterio de Información de Akaike ($AIC = 355.82$) y el Error Cuadrático Medio ($MSE = 8.35 \times 10^{-4}$), además de arrojar un valor $p \approx 0.66$ en la prueba de Kolmogorov-Smirnov, denotando un nivel de confianza alto. Por el contrario, el modelo Gamma es estadísticamente rechazado para esta frecuencia bajo un nivel de significancia del 5 % ($p < 0.05$).

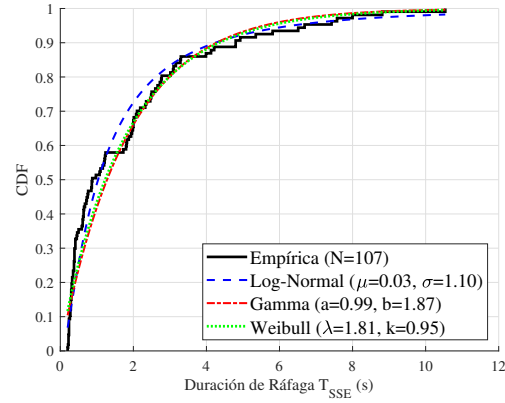
Para la frecuencia de 18 GHz, si bien todas las distribuciones superan el umbral de aceptación del estadístico K-S ($p > 0.05$), la distribución Log-Normal se ratifica como el modelo de mejor desempeño global al minimizar tanto el AIC (334.56) como el MSE (3.14×10^{-3}). Aunque la distribución de Weibull logra una distancia K-S marginalmente inferior en el punto de máxima desviación discreta, el modelamiento predictivo en el dominio del tiempo se ve regido por la minimización del error cuadrático, consolidando a la distribución Log-Normal como el estándar empírico.

Tabla 4.8: Métricas de bondad de ajuste para la duración de las ráfagas (T_{SSE}) a 2.4 GHz y 18 GHz.

Frecuencia	Distribución	Distancia K-S	p -value	AIC	MSE
2.4 GHz	Log-Normal	0.07	0.66	355.82	8.35×10^{-4}
	Gamma	0.13	0.04	369.83	3.73×10^{-3}
	Weibull	0.12	0.07	371.92	3.17×10^{-3}
18 GHz	Log-Normal	0.13	0.06	334.56	3.14×10^{-3}
	Gamma	0.13	0.05	349.95	4.44×10^{-3}
	Weibull	0.12	0.1	349.45	3.5×10^{-3}



(a) Ajuste a 2.4 GHz.



(b) Ajuste a 18 GHz.

Figura 4.11: CDFs empíricas frente a distribuciones teóricas para la duración de ráfagas (T_{SSE}).

Atendiendo a la naturaleza física del entorno de propagación, la convergencia hacia un modelo Log-Normal resulta coherente con la dinámica del escenario. Al ser una distribución definida para valores positivos y caracterizada por una asimetría positiva (sesgo hacia la derecha), el modelo refleja que la mayoría de los eventos de bloqueo son de corta duración, concentrando la masa de probabilidad en valores bajos. No obstante, la caída asintótica extendida de su función de densidad —típicamente asociada a comportamientos de cola pesada—, captura matemáticamente la ocurrencia de desvanecimientos inusualmente prolongados. En el contexto de un canal obstruido por peatones, esto modela de forma precisa situaciones críticas de baja probabilidad pero que afectan severamente la calidad del enlace, tales como transeúntes moviéndose a baja velocidad longitudinalmente al enlace, detenciones momentáneas en la línea de vista, o el solapamiento temporal de múltiples individuos.

4.2.2 Modelamiento Empírico de T_{clear}

Se ajustaron las distribuciones teóricas Log-Normal, Gamma y Weibull sobre la variable de tiempo de canal despejado. Los resultados de bondad de ajuste se exponen en la tabla 4.9 y su contraste visual se proyecta en las figuras 4.12a y 4.12b.

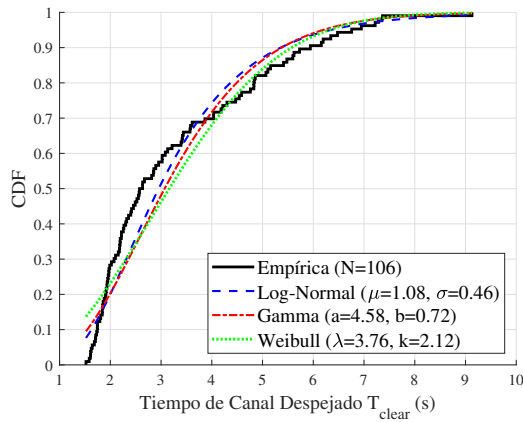
El análisis revela nuevamente la distribución Log-Normal como la mejor opción en ambas bandas de frecuencia. Para la frecuencia de 2.4 GHz, los modelos Gamma y Weibull son rechazados estadísticamente al presentar un p -value inferior al nivel de significancia del 5 % ($p < 0.05$). La distribución Log-Normal emerge como el único modelo válido ($p \approx 0.11$), logrando además la minimización conjunta del AIC (370.88) y el Error Cuadrático Medio ($MSE = 4.13 \times 10^{-3}$).

De manera análoga, en el enlace de 18 GHz, el modelo de Weibull es descartado ($p < 0.01$). Aunque la distribución Gamma logra superar marginalmente el umbral de aceptación, la Log-

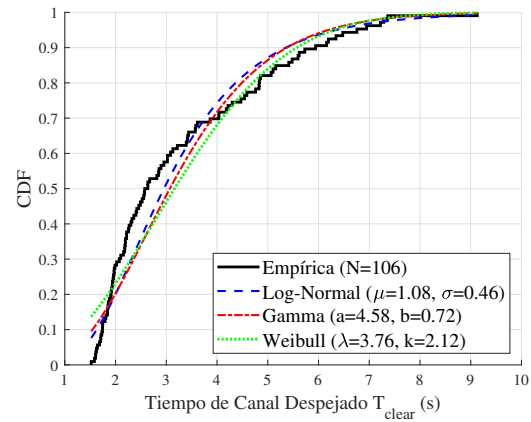
Normal demuestra nuevamente un mejor desempeño, alcanzando el mayor nivel de confianza ($p \approx 0.16$) y los menores índices de error predictivo ($AIC = 382.89$, $MSE = 2.11 \times 10^{-3}$).

Tabla 4.9: Métricas de bondad de ajuste para el tiempo de canal despejado (T_{clear}) bajo modelos con cola asimétrica.

Frecuencia	Distribución	Distancia K-S	p -value	AIC	MSE
2.4 GHz	Log-Normal	0.12	0.11	370.88	4.13×10^{-3}
	Gamma	0.14	0.03	380.78	5.56×10^{-3}
	Weibull	0.14	0.02	394.75	6.15×10^{-3}
18 GHz	Log-Normal	0.11	0.16	382.89	2.11×10^{-3}
	Gamma	0.12	0.07	397.57	3.91×10^{-3}
	Weibull	0.16	0.01	416.9	5.39×10^{-3}



(a) Ajuste a 2.4 GHz.



(b) Ajuste a 18 GHz.

Figura 4.12: CDFs empíricas frente a distribuciones teóricas avanzadas para el tiempo de canal despejado (T_{clear}).

Físicamente, el favorable desempeño del modelo Log-Normal para caracterizar T_{clear} describe adecuadamente la naturaleza intermitente de un entorno peatonal dinámico. La asimetría positiva de la distribución indica que la gran mayoría de las ventanas de conectividad interrumpida son breves, consecuencia directa del flujo constante y aleatorio de transeúntes bloqueando recurrentemente la línea de vista. No obstante, la caída paulatina de la función de densidad —su característica de cola pesada—, captura matemáticamente la probabilidad intrínseca de experimentar periodos prolongados de total disponibilidad del canal, asociados a vacíos temporales en el tránsito humano o fluctuaciones a la baja en la densidad de la multitud.

4.2.3 Modelamiento Empírico de la Atenuación Máxima (A_{max_SSE})

La caracterización probabilística de A_{max_SSE} dentro de un SSE es un parámetro crítico para el diseño de redes, ya que define empíricamente el margen de desvanecimiento requerido para sostener el balance del enlace bajo condiciones de bloqueo peatonal denso. Para mantener consistencia estocástica y metodológica con las variables temporales analizadas previamente, se sometieron a prueba tres modelos teóricos sobre los valores absolutos de profundidad (en dB): la distribución Log-Normal, la distribución de Weibull y la distribución Gamma.

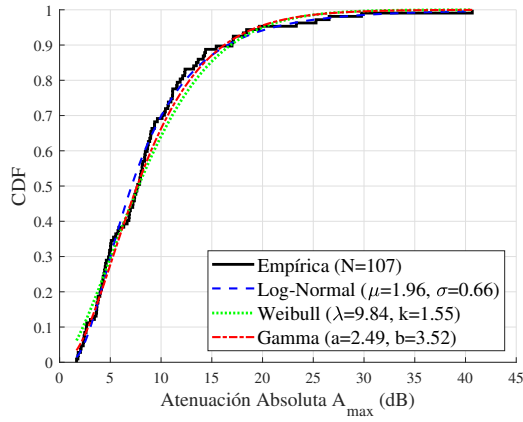
Las estadísticas de bondad de ajuste calculadas para modelar matemáticamente estas curvas se detallan en la tabla 4.10, mientras que la figura 4.13 ilustra la superposición de los modelos teóricos frente a las mediciones empíricas para ambas bandas de frecuencia.

Tabla 4.10: Métricas de bondad de ajuste para la profundidad máxima de atenuación (A_{max_SSE}) expresada en dB absolutos.

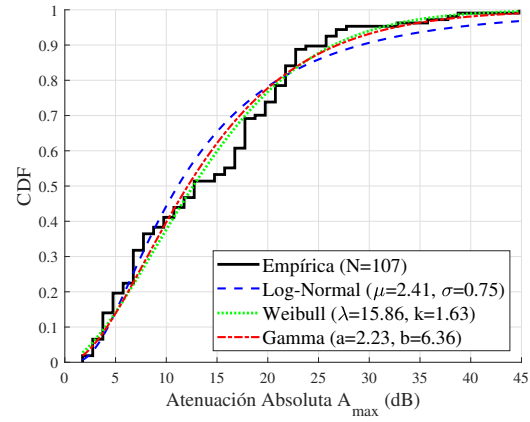
Frecuencia	Distribución	Distancia K-S	p -value	AIC	MSE
2.4 GHz	Log-Normal	0.08	0.54	637.43	6.8×10^{-4}
	Weibull	0.08	0.5	652.14	1.59×10^{-3}
	Gamma	0.06	0.8	643.24	8.67×10^{-4}
18 GHz	Log-Normal	0.16	0.01	761.31	3.52×10^{-3}
	Weibull	0.11	0.12	752.83	2.04×10^{-3}
	Gamma	0.13	0.04	753.59	2.49×10^{-3}

El análisis de las métricas revela un contraste estocástico fundamental en la naturaleza del bloqueo entre ambas frecuencias. Para el enlace de 2.4 GHz, los tres modelos teóricos superan la prueba de bondad de ajuste ($p \gg 0.05$). Si bien la distribución Gamma logra la menor distancia puntual ($K-S = 0.06$), la distribución Log-Normal se erige como el modelo de mayor precisión predictiva global al minimizar simultáneamente el Criterio de Akaike (AIC = 637.43) y el Error Cuadrático Medio (MSE = 6.80×10^{-4}).

Por el contrario, el comportamiento en el enlace a 18 GHz exhibe diferencias. Como se observa en la tabla 4.10 y se corrobora visualmente en la figura 4.13b, los modelos Log-Normal y Gamma no logran una representación adecuada del canal, siendo rechazados estadísticamente bajo un nivel de significancia del 5 % ($p < 0.05$). En este escenario, la distribución de Weibull emerge como el único modelo analizado que satisface el criterio de ajuste ($p \approx 0.12$), logrando además los menores índices de penalización global (AIC = 752.83, MSE = 2.04×10^{-3}).



(a) Ajuste a 2.4 GHz.



(b) Ajuste a 18 GHz.

Figura 4.13: Funciones de Distribución Acumulada (CDF) empíricas frente a distribuciones teóricas consistentes para la atenuación máxima de ráfagas (A_{max_SSE}).

Físicamente, el ajuste estadístico de la distribución de Weibull a 18 GHz evidencia un cambio en el comportamiento de propagación del canal: la atenuación máxima se distancia de la estadística multiplicativa clásica (Log-Normal) para aproximarse a los modelos descritos por la Teoría de Valores Extremos. Dado que a esta frecuencia la longitud de onda es reducida en comparación con las dimensiones del cuerpo humano, el transeúnte actúa predominantemente como un obstáculo altamente atenuante. En consecuencia, el impacto del bloqueo transiciona de una fluctuación moderada a eventos de desvanecimiento profundo. La distribución de Weibull, reconocida en la teoría de comunicaciones por su flexibilidad para modelar empíricamente canales con desvanecimientos más severos que los predichos por el modelo de Rayleigh, caracteriza de forma coherente la asimetría y la magnitud de estas caídas abruptas de señal. Para el dimensionamiento de redes de próxima generación, estos resultados indican que el margen de desvanecimiento en bandas altas no debiese calcularse únicamente en función de promedios espaciales, sino que el enlace requiere un diseño estadístico orientado a tolerar las atenuaciones máximas impuestas por la dinámica de la multitud.

Capítulo 5

Conclusiones y Trabajos Futuros

El desarrollo de este estudio permitió abordar uno de los desafíos significativos para el despliegue de las redes inalámbricas de próxima generación: la caracterización y el modelamiento estocástico de la atenuación inducida por el bloqueo humano sobre enlaces punto a punto en ambientes semi-exterieores. Mediante una metodología que contempló la calibración de hardware en cámara anecoica, la ejecución de campañas de medición tanto en escenarios controlados como con tráfico peatonal aleatorio, y el procesamiento digital en MATLAB, se logró consolidar una base de datos empírica para las bandas de 2.4 GHz y 18 GHz.

Al evaluar los resultados, se concluye que el objetivo general de caracterizar, cuantificar y modelar de forma empírica el impacto estocástico del tráfico peatonal fue alcanzado. La formulación matemática permitió evidenciar cómo la densidad y la dinámica de los transeúntes comprometen la disponibilidad temporal del canal. De igual manera, los objetivos específicos fueron abordados en su totalidad. Se diseñó, calibró y validó la topología geométrica del enlace punto a punto, aislando las pérdidas intrínsecas del hardware. Las campañas de medición semi-exterieores se ejecutaron sobre una multicancha con superficie modular de polipropileno que sirvió como cuadrícula de referencia espacial, permitiendo registrar la variabilidad de los cruces de los voluntarios. Asimismo, las rutinas algorítmicas implementadas en MATLAB permitieron extraer los parámetros deterministas fundamentales de los eventos individuales y agrupados basándose en los criterios estandarizados en [11], habilitando la evaluación de las distribuciones teóricas de probabilidad mediante pruebas de bondad de ajuste. En consecuencia, la investigación dio cumplimiento a los requerimientos académicos y técnicos planteados.

5.1 Hallazgos de la Investigación

La caracterización del comportamiento estocástico y el análisis del margen de desvanecimiento revelaron un comportamiento distinto al transitar de la frecuencia de 2.4 GHz ha-

cia 18 GHz. Para el enlace operativo a 2.4 GHz, los resultados empíricos ratificaron que la distribución Log-Normal describe de mejor manera los parámetros T_{SSE} , T_{clear} y A_{max_SSE} . Físicamente, este ajuste demuestra que a frecuencias bajas, donde la longitud de onda es de 125 mm y la primera Zona de Fresnel es robusta (0.4 m en el centro del trayecto), el desvanecimiento responde a una suma acumulativa de efectos multiplicativos suaves. Bajo estas condiciones, los mecanismos de difracción operan de manera eficiente, permitiendo que la señal electromagnética rodee el contorno de los cuerpos y se reconstituya antes de alcanzar el receptor.

En contraposición, el modelamiento de la atenuación máxima a 18 GHz exhibió un comportamiento diferente, donde los modelos Log-Normal y Gamma no lograron un ajuste estadístico adecuado. En este régimen de frecuencias, la distribución de Weibull fue la que mejor desempeño tuvo en las pruebas de ajuste. Físicamente, este resultado se asocia a que, al reducirse la longitud de onda a 16.7 mm, la primera zona de Fresnel se estrecha y el haz de energía queda más confinado. En consecuencia, la difracción deja de ser el mecanismo dominante y el cuerpo humano actúa predominantemente como un obstáculo altamente atenuante. El ajuste a la distribución de Weibull —utilizada en telecomunicaciones para caracterizar empíricamente canales con desvanecimientos severos—, indica que el bloqueo peatonal a 18 GHz produce caídas abruptas de señal que pueden superar los 30 dB de atenuación. Este comportamiento evidencia que, si bien la duración media de los eventos de bloqueo es menor a 18 GHz debido al rápido tránsito por un haz más estrecho, la recurrencia y magnitud de la atenuación inducen tasas de indisponibilidad que superan el 35.0 % del tiempo de observación para ambas frecuencias.

Adicionalmente, el análisis de la atenuación en función de la densidad peatonal (N) demostró que el promedio de los valores A_{mean} describe la tendencia central de las atenuaciones por bloqueo con una variabilidad reducida ($\sigma < 2$ dB). En contraste, el promedio de A_{max} evidenció una alta dispersión estocástica, alcanzando fluctuaciones con una desviación estándar superior a los 4 dB para 18 GHz. Las mediciones confirmaron un fenómeno de saturación espacial a partir de $N = 4$ peatones; de hecho, la transición hacia un quinto individuo ($N = 5$) produjo una ligera disminución en las pérdidas de propagación. Este comportamiento se atribuye a la dinámica del multitrayecto y a la dispersión múltiple, donde la aglomeración de cuerpos altera las componentes de fase y propicia interferencias constructivas en el receptor. A nivel predictivo, si bien un modelo de regresión logarítmica describe adecuadamente la saturación espacial para A_{mean} , la alta variabilidad de A_{max} a 18 GHz limita la viabilidad de este ajuste convencional, ratificando la necesidad de buscar otras alternativas.

Respecto a la caracterización temporal, la duración de los eventos de bloqueo exhibió una dependencia directa con la geometría del enlace y el radio de la primera zona de Fresnel. A 2.4 GHz, el mayor volumen del elipsoide ocasiona que la perturbación electromagnética

inicie antes, prolongando el desvanecimiento medio a 883.14 ms para el cruce de un individuo. Por el contrario, a 18 GHz, el confinamiento del haz genera interrupciones de menor extensión temporal (450 ms) pero de mayor magnitud de atenuación. Asimismo, se constató que el incremento en la cantidad de peatones prolonga de forma progresiva el tiempo total de obstrucción debido a la asincronía del grupo. Las discrepancias naturales en la marcha y morfología de los transeúntes fragmentan la sombra colectiva del obstáculo, generando espacios dinámicos que permiten la difracción parcial de la señal electromagnética durante los periodos de bloqueo múltiple.

Finalmente, la caracterización paramétrica mediante las distribuciones Log-Normal (para la variable temporal) y Weibull (para la atenuación máxima) constituye una base empírica fundamental para la simulación de canales. Al modelar matemáticamente la caída asintótica prolongada de estas distribuciones —lo que se traduce en una probabilidad no despreciable de experimentar eventos extremos—, las estadísticas obtenidas facilitan la generación computacional de datos que representan el comportamiento estocástico de un entorno peatonal. En consecuencia, esta herramienta predictiva permite evaluar el desempeño de protocolos de red y ajustar los márgenes de desvanecimiento de forma precisa, asegurando la confiabilidad del enlace frente a los bloqueos más severos.

5.2 Limitaciones de la Investigación

A pesar de la solidez de los modelos obtenidos, el desarrollo de la fase experimental estuvo condicionado por restricciones técnicas y logísticas. La limitación más crítica radica en la asimetría temporal del equipamiento disponible. El analizador de espectros SAF Spectrum Compact cuenta con una baja frecuencia de muestreo nativa de apenas 7.58 muestras por segundo en comparación con la tasa de 10 Msps del transceptor ADALM-PLUTO. Si bien se implementó un algoritmo de interpolación PCHIP en MATLAB para incrementar la densidad a 80 muestras por segundo, la baja resolución de captura original representa una limitante que podría no reflejar la naturaleza transitoria real del canal ni capturar desvanecimientos ultrarápidos a 18 GHz. Esta falta de granularidad se vio agravada porque el software dedicado del hardware SAF exporta los registros cronológicos con una precisión limitada a números enteros de un segundo, provocando que múltiples muestras capturadas consecutivamente se etiquetaran dentro del mismo segundo. Al intentar correlacionar temporalmente el perfil de atenuación normalizado con la validación audiovisual de las trayectorias en el escenario aleatorio, este colapso en la marca de tiempo generó inconcordancias temporales que dificultaron la sincronización exacta de los eventos.

Adicionalmente, el montaje experimental en la multicancha no dispuso de instrumental de precisión para la cuantificación de los ángulos de elevación e inclinación de los trípodes.

La ausencia de instrumentos de medición pudo introducir ligeros errores de microdesalineación física, inyectando fluctuaciones espurias en la estabilidad de la potencia basal. Desde la perspectiva logística, la coordinación de las agendas de los cinco voluntarios supuso una fuerte limitante, restringiendo la base estadística de la campaña controlada a un total de 30 cruces exitosos por cada caso de estudio. Este volumen muestral contrasta con los extensos conjuntos de datos que utilizan en [25]. Por último, la memoria de almacenamiento interna del receptor SAF restringió la captura de datos continuos durante ventanas temporales prolongadas. Como estrategia de optimización para mitigar esta última barrera y reducir el uso del recinto deportivo, se tomó la decisión de construir los dos enlaces de radiofrecuencia de forma adyacente, posicionando las antenas una al lado de la otra para recortar el tiempo total de medición a la mitad.

5.3 Trabajos Futuros

A partir de los resultados obtenidos y las limitaciones instrumentales identificadas, se proponen las siguientes líneas de trabajo futuro. En primer lugar, se requiere evaluar si la disposición de ambos enlaces en una configuración adyacente indujo distorsiones por interferencia mutua. Es pertinente diseñar una campaña de medición orientada a determinar si la dispersión electromagnética producida por el tránsito de personas en la periferia del escenario de medición —fuera de la primera zona de Fresnel— o la estructura física de la antena vecina, actúan como reflectores pasivos capaces de inducir componentes de multitrayecto adicionales. Aislar y cuantificar este posible acoplamiento cruzado aportará un criterio de análisis necesario para validar la independencia de los sistemas cuando operan en montajes espacialmente compactos.

En segundo lugar, se propone explorar soluciones de hardware para subsanar la asimetría en la resolución temporal observada a 18 GHz. Una alternativa viable consiste en la integración de un módulo mezclador de radiofrecuencia externo que actúe como un convertidor descendente (*downconverter*). Este dispositivo trasladaría la señal portadora de 18 GHz hacia una frecuencia intermedia compatible con el rango del puerto de recepción del transceptor ADALM-PLUTO. Al canalizar ambas bandas a través de la misma arquitectura de SDR, se unificaría la tasa de muestreo a 10 Msps, estandarizando los perfiles temporales y mejorando la captura de eventos transitorios de bloqueo. Como alternativa secundaria, se plantea sustituir los receptores compactos por un Analizador de Redes Vectoriales (VNA) portátil con capacidad de análisis en el dominio del tiempo para rangos superiores a 20 GHz, lo cual permitiría registrar los datos con una velocidad de barrido e intervalo dinámico orientados al desarrollo de modelos de canal dinámicos estandarizados.

Bibliografía

- [1] A. Aragón-Zavala, *Indoor Wireless Communications: From Theory to Implementation*. John Wiley & Sons, 2017.
- [2] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. John Wiley & Sons, 2016.
- [3] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. Prentice Hall, 2002.
- [4] J. S. Seybold, *Introduction to RF Propagation*. John Wiley & Sons, 2005.
- [5] Nokia, “Global network traffic report: Understanding the growing impact of advancing technologies on future networks,” Nokia Corporation, Tech. Rep., 2025.
- [6] Ericsson, “Ericsson mobility report,” Ericsson, Tech. Rep., November 2025.
- [7] P. Oyie and T. Afullo, “Spatiotemporal statistical channel model for indoor corridor at 14 ghz, 18 ghz, and 22 ghz bands,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 3, pp. 2160–2171, 2018.
- [8] M. A. Do and S. Sun, “Statistical modeling of broadband wireless lan channels at 18 ghz using directive antennas,” *International Journal of Wireless Information Networks*, vol. 4, no. 1, pp. 21–30, 1997.
- [9] T. Chrysikos, G. Georgopoulos, and S. Kotsopoulos, “Impact of shadowing on wireless channel characterization for a public indoor commercial topology at 2.4 ghz,” in *2010 International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. IEEE, 2010, pp. 281–286.
- [10] A. Alabish, S. Kara, A. Al-Sarawi, and D. Abbott, “An experimental study towards examining human body shadowing impact on 18-22 ghz intra-wban communication links,” in *2018 International Conference on Radar (RADAR)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.

- [11] S. Collonge, G. Zaharia, and G. E. Zein, "Influence of the human activity on wide-band characteristics of the 60 ghz indoor radio channel," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 6, pp. 2396–2406, November 2004.
- [12] A. P. Yuste, J. L. Pachacama, and J. S. Garcia, "Characterization of the 2.4 ghz-band using a semiempirical model and a ray tracing model," in *IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023, pp. 1041–1046.
- [13] T. Chrysikos, P. Georgakopoulos, I. Oikonomou, S. Kotsopoulos, and D. Zevgolios, "Channel measurement and characterization for a complex industrial and office topology at 2.4 ghz," in *2017 11th International Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications (SKIMA)*. IEEE, 2017, pp. 1–7.
- [14] N. O. Oyie and T. J. O. Afullo, "An empirical approach to omnidirectional path loss and line-of-sight probability models at 18 ghz for 5g networks," in *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., December 2018, pp. 129–136.
- [15] Rakesh and E. Viterbo, "Channel modeling for wireless communications using ambit fields," *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, vol. 1, pp. 246–260, 2020.
- [16] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press, 2005.
- [17] H. Kaur and S. Khan, "5g and beyond: On the significance of wireless channel modeling and challenges," *Wireless Personal Communications*, vol. 135, no. 1, pp. 1–23, 2024.
- [18] M. Alhammadi, M. Almansoori, I. Tesfu, D. Habte, and I. Ahmed, "Large-scale empirical model for a 2.4 ghz wireless network in an outdoor environment," in *2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*. IEEE, 2019.
- [19] K. Preusser and A. Schmeink, "Robust channel modeling of 2.4 ghz and 5 ghz indoor measurements: Empirical, ray tracing, and artificial neural network models," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 1, pp. 559–572, 2022.
- [20] T. Yu, Y.-G. Kim, and D.-H. Cho, "Statistical channel model based on passive measurements at 2.4 ghz and 5.8 ghz for indoor office environments," in *2024 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*. IEEE, 2024, pp. 1–5.

- [21] J. V. Mankowski, H. Vijayaraghavan, Y. Hilla, and W. Kellerer, "Characterization of the 2.4- and 5-ghz channels in a single-aisle commercial aircraft cabin using ray tracing," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 60, no. 2, pp. 1386–1399, 2024.
- [22] I. E. Lamri, M. Nedil, M. N. E. Temmar, and N. Kandil, "Near-ground propagation channel modelling and analysis in underground mining environment at 2.4 ghz," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2025.
- [23] V. Kristem, T. S. Rappaport, and G. R. MacCartney, "Outdoor wideband channel measurements and modeling in the 3-18 ghz bands," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 614–617, 2018.
- [24] M. K. Elmezughi, T. J. Afullo, and N. O. Oyie, "Performance study of path loss models at 14, 18, and 22 ghz in an indoor corridor environment for wireless communications," *SAIEE Africa Research Journal*, vol. 112, no. 1, pp. 32–45, March 2021.
- [25] L. A. Fierro, E. C. Maggi, A. A. Vázquez, and D. Schkolnik, "Empirical results for human-induced shadowing events for indoor 60 ghz wireless links," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 44 522–44 533, 2020.